

ПРИВОЛЖСКИЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

2/2026

2

2026



ISSN 1995-2511



ПРИВОЛЖСКИЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Периодическое научное издание

№ 2

Июнь 2026

Нижний Новгород

ББК 95; я5

П 75

ПРИВОЛЖСКИЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ, № 2 (78)

Периодическое научное издание. Н. Новгород, ННГАСУ, 2026. 336 с., 14 л. цв. вклеек.

Учредитель и издатель: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (ННГАСУ). Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77 – 47479 от 25.11.2011 г. Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны. Языки – русский, английский.

Статьи рецензируются. Перепечатка без разрешения редакции запрещена, ссылки на журнал при цитировании обязательны.

«Приволжский научный журнал» входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук по группе научных специальностей 2.1 – «Строительство и архитектура».

Главный редактор акад. РААСН, д-р арх., проф. А. Л. ГЕЛЬФОНД
Заместитель главного редактора, д-р техн. наук, доц. Д. В. МОНИЧ
Ответственный секретарь д-р техн. наук, доц. П. А. ХАЗОВ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

д-р техн. наук, доц. Е. В. АРЕФЬЕВА; акад. РААСН, д-р арх., проф. Е. А. АХМЕДОВА; д-р техн. наук, проф. М. И. БАЛЪЗАННИКОВ; чл.-корр. РААСН, проф. В. Н. БОБЫЛЕВ; д-р техн. наук, проф. М. В. БОДРОВ; д-р техн. наук, проф. А. М. БРАГОВ; д-р техн. наук, проф. А. Л. ВАСИЛЬЕВ; д-р техн. наук, доц. А. Н. ГАЙДО; д-р биол. наук, проф. Д. Б. ГЕЛАШВИЛИ; д-р наук, проф. Р. ГРЭФЕ; засл. деят. науки РФ, чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф. Л. Н. ГУБАНОВ; д-р техн. наук, проф. А. И. ЕРЕМКИН; д-р физ.-мат. наук, проф. В. И. ЕРОФЕЕВ; акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. В. Т. ЕРОФЕЕВ; д-р наук, проф. М. ИВЕТИЧ; д-р техн. наук, проф. Д. В. КОЗЛОВ; д-р техн. наук, проф. Е. В. КОНОПАЦКИЙ; д-р техн. наук, проф. А.А. ЛАПИДУС; д-р арх., доц. А. В. ЛИСИЦЫНА; д-р техн. наук, доц. В. В. МОЛОДИН; д-р техн. наук, доц. З. Р. МУХАМЕТЗЯНОВ; д-р наук, проф. Ф. НЕСТМАНН; д-р техн. наук, канд. экон. наук, доц. Л. А. ОПАРИНА; д-р техн. наук, проф. К. Л. ПАНЧУК; д-р техн. наук, доц. Е. В. ПОЗНЯК; д-р техн. наук, проф. Е. В. ПОПОВ; д-р техн. наук, проф. С. И. РОТКОВ; д-р техн. наук, проф. И. С. СОБОЛЬ; д-р техн. наук, проф. С. В. СТЕПАНОВ; засл. деят. науки РФ, д-р физ.-мат. наук, проф. Р. Г. СТРОНГИН; д-р техн. наук, проф. В. П. СУЧКОВ; засл. деят. науки РФ, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. В. И. ТЕЛИЧЕНКО; д-р техн. наук, проф. А. В. ТОЛОК; засл. деят. науки РФ, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. В. И. ТРАВУШ; д-р техн. наук, доц. Д. В. УЛЬРИХ; засл. деят. науки РФ, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. С. В. ФЕДОСОВ; д-р физ.-мат. наук, проф. Г. В. ФЕДОТЕНКОВ; д-р техн. наук, проф. Р. С. ФЕДЮК; д-р техн. наук, проф. М. Н. ЧЕКАРДОВСКИЙ; д-р физ.-мат. наук, проф. Е. В. ЧУПРУНОВ; д-р техн. наук, проф. А. И. ШЕИН

Редактор М. А. Путилова, компьютерная верстка И. К. Красавина,
переводчик Д. А. Лошкарева, работа со списками литературы Л. Б. Вержиковская

Подписано в печать 30.06.2026 г. Формат 70×108/16. Бумага офсетная
Печать офсетная. Усл. печ. л. 29,4 + вкл. 2,45. Тираж 600 экз. Заказ №

Адрес издателя и редакции: Россия, 603952, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65.
Тел./факс: (831) 433-04-36 (редакция), (831) 430-19-46 (отв. секретарь);
эл. почта: pnj-sec@mail.ru (отв. секретарь), red@nngasu.ru (редакция),
интернет-сайт: www.pnj.nngasu.ru; pnj.nngasu.ru
Подписной индекс «Урал-Пресс»: 80382. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ИП Кузнецов Н. В.
Адрес: Россия, 603057, г. Нижний Новгород, ул. Шорина, д. 13/13, п. 1

ISSN 1995-2511

© ННГАСУ, 2026

ISSN 1995-2511



THE PRIVOLZHSKY SCIENTIFIC JOURNAL

Scientific periodical

№ 2

June 2026

Nizhny Novgorod

THE PRIVOLZHISKY SCIENTIFIC JOURNAL, № 2 (78)

Scientific periodical. Nizhny Novgorod, NNGASU, 2026. 336 p., 14 p. of colour illustrations.

Founder & Publisher: The Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNGASU). Registered by the Federal service for supervision of communications, information technology, and mass media. Registration certificate ПИ № ФС77 – 47479 dt. 25.11.2011. Circulation – the Russian Federation, foreign countries. Languages – Russian, English.

This is a peer viewed publication. Copying is not allowed without prior permission of the editors, references to the journal during citing are obligatory.

The Privolzhsky Scientific Journal is included into the list of leading peer viewed journals and publications where basic scientific results of doctoral and candidate dissertations are to be published of scientific specialities 2.1 – "Construction and architecture".

Editor-in-chief academician of RAACS, doctor of architecture, professor A. L. GELFOND
Deputy chief editor doctor of technical sciences, associate professor D. V. MONICH
Executive secretary doctor of tech. sciences, associate professor P. A. KHAZOV

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

doctor of technical sciences, associated professor, E. V. AREFIEVA; academician of RAACS, doctor of architecture, professor E. A. AKHMEDOVA; doctor of technical sciences, professor M. I. BALZANNIKOV; corresponding member of RAACS, professor V. N. BOBYLYOV; doctor of technical sciences, professor M. V. BODROV; doctor of technical sciences, professor A. M. BRAGOV; doctor of technical sciences, professor A. L. VASILIEV; doctor of technical sciences, associated professor A. N. GAIDO; doctor of biological sciences, professor D. B. GELASHVILI; Ph.D., professor R. GRAEFE; honoured worker of science of RF, corresponding member of RAACS, doctor of technical sciences, professor L. N. GUBANOV; doctor of technical sciences, professor A. I. EREMOKIN; doctor of physical-mathematical sciences, professor V. I. EROFEEV; academician of RAACS, doctor of technical sciences, professor V. T. EROFEEV; doctor of science, professor M. IVETICH; doctor of technical sciences, professor D. V. KOZLOV; doctor of technical sciences, professor E. V. KONOPATSKIY; doctor of technical sciences, professor A.A. LAPIDUS; doctor of architecture, associate professor A.V. LISITSYNA; doctor of technical sciences, associated professor V. V. MOLODIN; doctor of technical sciences, associated professor Z. R. MUKHAMETZANOV; Prof. Dr.-Ing. F. NESTMANN; doctor of technical sciences, candidate of economy sciences, associated professor L. A. OPARINA; doctor of technical sciences, professor K.L. PANCHUK; doctor of technical sciences, associated professor E. V. POZNYAK; doctor of technical sciences, professor E. V. POPOV; doctor of technical sciences, professor S. I. ROTKOV; doctor of technical sciences, professor I. S. SOBOLE; doctor of technical sciences, professor S. V. STEPANOV; honoured worker of science of RF, doctor of physical-mathematical sciences, professor R. G. STRONGIN; doctor of technical sciences, professor V. P. SUCHKOV; honoured worker of science of RF, academician of RAACS, doctor of technical sciences, professor V. I. TELICHENKO; doctor of technical sciences, professor A. V. TOLOK; honoured worker of science of RF, academician of RAACS, doctor of technical sciences, professor V. I. TRAVUSH; doctor of technical sciences, associated professor D. V. ULRICH; honoured worker of science of RF, academician of RAACS, doctor of technical sciences, professor S.V. FEDOSOV; doctor of physical-mathematical sciences, professor G.V. FEDOTENKOV; doctor of technical sciences, professor R.S. FEDIUK; doctor of technical sciences, professor M. N. CHEKARDOVSKY; doctor of physical-mathematical sciences, professor E. V. CHUPRUNOV; doctor of technical sciences, professor A. I. SHEIN

Editor M. A. Putilova, computer makeup I. K. Krasavina,
translator D. A. Loshkareva, literature references L. B. Verzhikovskaya

Signed for publishing on 30.06.2026. Format 70×108/16. Offset paper.
Offset printing. Ref. publ. p. 29.4 + illust. 2.45. Copies 600. Order №

Publisher's address: 65 Iljinskaya St., 603952, Nizhny Novgorod, Russia.
Tel./fax: +7 (831) 433-04-36 (editors), +7 (831) 430-19-46 (executive secretary);
e-mail: pnj-sec@mail.ru (executive secretary), red@nngasu.ru (redaction),
web-site: www.pnj.nngasu.ru; пнж.ннгасу.рф
Subscription index "Ural-Press": 80382. Price is unfixed.

Printed in publishing house of Individual entrepreneur Kuznetsov N. V.
Address: of. 1, 13/13, Shorin st., Nizhny Novgorod, 603057, Russia.



СОДЕРЖАНИЕ

К юбилею академика В. И. Травуша

К юбилею профессора А. В. Лисицыной

К юбилею профессора О. В. Орельской

К юбилею профессора А. Г. Кочева

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА И ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

- Белов В. В., Балушкин А. Л. Расчетная модель критической наклонной трещины при поперечном изгибе железобетонных элементов. Часть I..... 9
- Ведерникова А. А. Процесс деформирования трубобетонных элементов конструкций в предельных и запредельных стадиях работы 20
- Гайнетдинов Р. Г., Салимзянов И. Р. Решетчатые конструкции из стальных холодногнутых профилей..... 30
- Маркина Ю. Д. Влияние детализации схемы передачи нагрузок от оборудования на результаты расчета металлической решетчатой башни 41
- Ерофеев В. И., Молодушная Н. И., Никитина Е. А. Дисперсионные характеристики изгибных волн в балке Бернулли-Эйлера с учетом релаксации тепловых и диффузионных потоков 53

ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ И СООРУЖЕНИЯ, ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ, ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ОХРАНА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

- Васильев А. Л., Балобанов А. С. Использование ультразвука для интенсификации процессов коагулирования поверхностных вод в системах водоподготовки 70
- Бодров М. В., Миронов В. В., Пылаев А. Н., Бешляга А. В. Исследование методов расчета низконапорных вихревых труб в системах кондиционирования воздуха..... 80
- Гусейнова С. М., Васильев А. Л., Катраева И. В., Калина О. В. Анализ процессов образования и технологий обработки возвратных вод участков механического обезвоживания осадков городских сточных вод..... 88
- Бодров М. В., Руин А. Е., Смыков А. А., Елизаров А. Д. Исследование теплотехнических характеристик профилей систем радиационного охлаждения..... 96
- Лапин Е. С., Левцев А. П., Сергушина Е. С., Панфилов С. А., Кабанов О. В., Кашуркин А. Ю., Усиков С. М. Влияние колеблющегося потока на теплообмен 104
- Суворов И. В. Эффективность применения многокомпонентной загрузки для очистки промывных вод станций обезжелезивания 114

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА, ПРОИЗВОДСТВО СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

- Байбурин А. Х., Акимов С. Г., Байбурин Д. А. Влияние эксплуатационных факторов на точность неразрушающих методов контроля прочности бетона 124
- Мухаметзянов З. Р., Султанова Е. А., Зарипов М. З., Аллаяров А. А. Основы обеспечения устойчивости организационно-технологических решений по строительству отраслевых комплексов..... 133
- Бессонов И. В., Жуков А. Д., Гудков П. К., Малова Э. А., Говряков И. С. Легкие керамические материалы и их структурные характеристики..... 140
- Розанцева Н. В., Дроздов А. Д. Экологически ориентированная концепция транспортировки и складирования сыпучих материалов из железнодорожного транспорта в силосы..... 149
- Каюмова Э. И., Мухаметзянов З. Р., Пудовкин А. Н. Минеральный порошок для асфальтобетонов из отходов содового производства..... 165



АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

| | |
|---|-----|
| Орлова Л. Н., Норенков С. В., Крашенинникова Е. С. Ансамблевость и комплексное развитие территорий в архитектурно-градостроительной урбанистике (на примере Нижнего Новгорода) | 171 |
| Шумилкин А. С., Шумилкин С. М. Нижегородская архитектурно-реставрационная школа XXI века..... | 179 |
| Филлалли А., Ахмедова Е. А., Авдонина А. В. Теоретико-методологические основы и комплексная архитектурно-пространственная оценка сохранения и развития архитектурной среды исторических кварталов Эр-Рияда..... | 186 |
| Шумилкин С. М., Баринов Д. В. Объемно-пространственные композиции храмов Нижегородской области конца XVIII – первой половины XIX веков..... | 196 |
| Скопинцев А. В., Китаева И. В. Особенности формирования университетских стартап-студий ... | 203 |
| Ленько А. В. Задачи формирования водно-зеленого каркаса нижегородской агломерации | 214 |
| Аль Рабади Рана Башир Еид, Галишкинова В. В. Региональная архитектурная идентика в условиях глобальной типизации жилой застройки: критический анализ современной архитектуры Иордании | 221 |
| Алам Эль Дин Сабрина Хассан, Гарькин И. Н., Курочкина В. А. Эволюция архитектурных принципов формирования инновационных центров под влиянием концепции устойчивого развития | 231 |
| Белан В. С., Курочкина В. А. Проблемы ценности эстетики индустриальной архитектуры в современном городе..... | 240 |
| Dutsev M. V., Massaquoi T. A. Critical regionalism and the formation of resilient cultural identity in contemporary hotel architecture in Freetown, Sierra-Leone | 249 |
| Жабер М., Гельфонд А. Л. Геном марокканского жилища: алгоритмическое кодирование и генеративная реализация | 255 |
| Мартынов С. В., Гладышева М. В., Ерофеева И. В. Концепция развития территории на примере г. Пермь | 265 |
| Медани Шоайб, Курочкина В. А. Адаптация архитектуры к экстремальным температурным условиям | 275 |
| Муфтигалиева А. А., Фурман Н. В. Формирование архитектурного облика Уралья в XVIII – начале XX века..... | 287 |
| Баринов Д. В. Типы планировочных построений храмов Нижегородской области конца XVIII – первой половины XIX веков..... | 294 |
| Пирогов Д. А. Архитектура быстровозводимых объектов религиозного назначения..... | 302 |

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ЦИФРОВАЯ ПОДДЕРЖКА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ

| | |
|---|-----|
| Суханова Н. Т., Зимин М. А. Сравнительный анализ методов квантования детекторов объектов в мобильных системах технического зрения реального времени..... | 309 |
| Хазов П. А., Шилов С. С., Молоснова Н. Д., Ситникова А. К. Оценка точности системы расчета аэродинамических параметров глобальных поверхностей на примере здания в форме гиперболоида вращения..... | 317 |

ИНФОРМАЦИОННЫЙ РАЗДЕЛ

| | |
|---|-----|
| Новые издания..... | 327 |
| Перечень требований и условий для публикации научной статьи в периодическом научном издании «Приволжский научный журнал»..... | 329 |
| НА ОБЛОЖКЕ: Левобережье Оки и микрорайон "Юг", Нижний Новгород. Автор фото: Сатанова С.В. | |



CONTENTS

On of the anniversary of academician V. I. Travush

On of the anniversary of professor A. V. Lisitsyna

On of the anniversary of professor O. V. Orelskaya

On of the anniversary of professor A. G. Kochev

BUILDING CONSTRUCTIONS, STRUCTURAL MECHANICS AND HYDRAULIC ENGINEERING

- Belov V. V., Balushkin A. L.** Calculation model of critical inclined crack under transverse bending of reinforced concrete elements. Part I..... 9
- Vedernikova A. A.** Ultimate and under ultimate concrete filled steel tube columns deformation behavior..... 20
- Gaynetdinov R. G., Salimzyanov I. R.** Lattice structures made of cold-formed steel sections..... 30
- Markina Yu. D.** Influence of the level of detail in the load transfer scheme from equipment on the analysis results of a steel latticed tower..... 41
- Erofeev V. I., Molodushnaya N. I., Nikitina E. A.** Dispersion characteristics of flexural waves in a Bernoulli-Euler beam with account for relaxation of thermal and diffusion fluxes..... 53

ENGINEERING NETWORKS AND STRUCTURES, ENGINEERING HYDROLOGY, ENVIRONMENTAL PROTECTION AND WATER RESOURCES CONSERVATION

- Vasilev A. L., Balobanov A. S.** Using ultrasonic technology to intensify coagulation processes of surface water in water treatment systems..... 70
- Bodrov M. V., Mironov V. V., Pylaev A. N., Beshlyaga A. V.** Research of calculation methods of low-pressure vortex tubes in air conditioning systems..... 80
- Guseinova S. M., Vasilev A. L., Katrayeva I. V., Kalina O. V.** Analysis of formation processes and return water treatment technologies for mechanical sludge dewatering facilities in municipal wastewater treatment..... 88
- Bodrov M. V., Ruin A. E., Smykov A. A., Elizarov A. D.** Investigation of thermal characteristics of profiles in radiant cooling systems..... 96
- Lapin E. S., Levtshev A. P., Sergushina E. S., Panfilov S. A., Kabanov O. V., Kashurkin A. Yu., Usikov S. M.** Effect of oscillating flow on heat transfer..... 104
- Suvorov I. V.** Efficiency of multicomponent filter media for treating backwash water from iron-removal plants..... 114

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION, BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS MANUFACTURING

- Bayburin A. Kh., Akimov S. G., Bayburin D. A.** Influence of operational factors on the accuracy of non-destructive methods of concrete strength testing..... 124
- Mukhametzyanov Z. R., Sultanova E. A., Zaripov M. Z., Allayarov A. A.** Bases of sustainability of organizational and technological solutions for construction of industrial complexes..... 133
- Bessonov I. V., Zhukov A. D., Gudkov P. K., Malova E. A., Govryakov I. S.** Lightweight ceramic materials and their structural characteristics..... 140
- Rozantseva N. V., Drozdov A. D.** Environmentally friendly concept for transporting and storing bulk materials from rail transport to silos..... 149
- Kayumova I. I., Mukhametzyanov Z. R., Pudovkin A. N.** Mineral powder for asphalt concretes from soda production waste..... 165



ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

- Orlova L. N., Norenkov S. V., Krashenninnikova E. S.** Ensemble approach and comprehensive territorial development in architectural and urban planning (a case study of Nizhny Novgorod)..... 171
- Shumilkin A. S., Shumilkin S. M.** Nizhny Novgorod architectural and restoration school of the 21st century..... 179
- Fillali A., Akhmedova E. A., Adonina A. V.** Theoretical and methodological foundations and integrated architectural and spatial assessment for the conservation and development of the historical architectural environment in Riyadh..... 186
- Shumilkin S. M., Barinov D. V.** Volumetric and spatial compositions of churches in the Nizhny Novgorod region in the late 18th and the first half of the 19th centuries..... 196
- Skopintsev A. V., Kitaeva I. V.** Features of the formation of university startup studios..... 203
- Lenko A. V.** Strategic objectives for developing the blue-green framework of the Nizhny Novgorod agglomeration..... 214
- Al-Rabadi Rana Basheer Eid, Galishnikova V. V.** Regional architectural identity in the context of global standardization of housing development: a critical analysis of contemporary architecture in Jordan..... 221
- Alam El Din S. H., Garkin I. N., Kurochkina V. A.** Evolution of architectural design principles for innovation centers driven by sustainable development..... 231
- Belan V. S., Kurochkina V. A.** Challenges in defining the aesthetic value of industrial architecture in the contemporary city..... 240
- Дуцев М. В., Массакон Т. А.** Критический регионализм и формирование устойчивой культурной идентичности в современной архитектуре отелей во Фритауне, Сьерра-Леоне..... 249
- Jaber M., Gelfond A. L.** Moroccan housing genome: algorithmic encoding and generative implementation..... 255
- Martynov S. V., Gladysheva M. V., Erofeeva I. V.** Territory development concept: the case of Perm. 265
- Medani Choayb, Kurochkina V. A.** Adaptation of architecture to extreme temperature conditions..... 275
- Muftigaliyeva A. A., Furman N. V.** Formation of the architectural appearance of Uralsk in the 18th – early 20th centuries..... 287
- Barinov D. V.** Types of plan compositions of churches in the Nizhny Novgorod region in the late 18th and the first half of the 19th centuries..... 294
- Pirogov D. A.** Architecture of rapidly erected religious structures..... 302

GEOMETRIC AND COMPUTER MODELING OF TECHNICAL SYSTEMS, DIGITAL SUPPORT OF THE PRODUCT LIFECYCLE

- Sukhanova N. T., Zimin M. A.** Comparative analysis of quantization methods for object detectors in real-time mobile vision systems..... 309
- Khazov P. A., Shilov S. S., Molosnova N. D., Sitnikova A. K.** Accuracy evaluation of the automated system for calculating the aerodynamic parameters of globoid surfaces: a case study of a hyperboloid of rotation structure..... 317

INFORMATION SECTION

- New publications..... 327
- List of requirements for publication in the scientific periodical “The Privolzhsky scientific journal”..... 329

COVER PAGE: The left bank of the Oka River and the "South" microdistrict, Nizhny Novgorod. Photo by Satanova S. V.

ЮБИЛЕЙ АКАДЕМИКА РААСН ТРАВУША ВЛАДИМИРА ИЛЬИЧА



4 мая 2026 года исполнилось 90 лет вице-президенту и академику РААСН, выдающемуся конструктору и ученому мирового уровня, Заслуженному деятелю науки Российской Федерации, Заслуженному строителю Российской Федерации, Почетному строителю России и Москвы, кавалеру ордена Трудового Красного Знамени, Лауреату Премии Совета Министров СССР, трижды Лауреату Премии Правительства Российской Федерации, автору сотен научных трудов и авторских свидетельств в области проектирования общественных зданий и сооружений, строительной механики и расчета строительных конструкций, действительному члену МААМ, доктору технических наук, профессору Владимиру Ильичу Травушу.

Особое место в его профессиональной биографии занимает развитие отечественной школы высотного и большепролетного строительства. Многие уникальные здания, которые были возведены при непосредственном участии и авторстве В. И. Травуша, стали символами советской и российской эпох. Среди них: Останкинская телевизионная башня (Москва, 1967 – строительство, 2006 – восстановление и реконструкция после пожара); Дворец спорта профсоюзов (Архангельск, 1980); Олимпийский дворец спорта «Динамо» (Москва, 1980); большепролетный Дворец спорта (Тверь, 1982); Музей Хо Ши Мина (Ханой, 1990); крытый рынок (Ржев, 1990); спорткомплекс «Москворечье» (Москва, 1993); мост «Багратион» через реку Москва в комплексе Московского международного делового центра «Москва-Сити» (Москва, 1997); административное здание «Башня 2000» в комплексе «Москва-Сити» (Москва, 2001); крытый конькобежный центр в Крылатском (Москва, 2004); Большая ледовая арена для хоккея с шайбой и трасса для бобслея в Сочи; административное здание в Астане (Казахстан); Центральное ядро «УГМК-Арена – многофункциональная ледовая арена в Екатеринбурге, 2025).

Сегодня под руководством и при непосредственном участии В. И. Травуша разрабатываются следующие объекты: Технопарк ПАО Сбербанк в инновационном центре «Сколково» (Москва); Ялта – Жилой комплекс (Республика Крым, Ялта); «СИБУР» – Корпоративный центр ООО «СИБУР» (Москва, ул. Большая Якиманка д. 2); Монумент в честь победы России в Северной войне 1700–1721 гг. (Санкт-Петербург); Офисно-административные здания «Лахта-2» высотой 703 м и «Лахта-3» высотой 555 м в Санкт-Петербурге.

В. И. Травуш внес значительный вклад в отечественную и мировую науку по ряду направлений: строительная механика, математический расчет строительных конструкций, совершенствование всех типов железобетонных, монолитных, металлических и деревянных конструкций, в создание инновационных технологий возведения высотных зданий и уникальных сооружений. Под научным руководством В. И. Травуша в 2016 году был разработан свод правил «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования».

Ведет многолетнюю научную и преподавательскую деятельность. Им подготовлено более 50 кандидатов и докторов наук.

Редакция «Приволжского научного журнала» от всей души поздравляет уважаемого Владимира Ильича и желает крепкого здоровья, новых научных и творческих достижений.

ЮБИЛЕЙ ПРОФЕССОРА ННГАСУ ЛИСИЦЫНОЙ АЛЕКСАНДРЫ ВЛАДИСЛАВОВНЫ



12 мая 2026 года Александра Владиславовна Лисицина, доктор архитектуры, профессор кафедры архитектурного проектирования ННГАСУ, член совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук, 24.2.343.01, созданного на базе ННГАСУ, отметила свой юбилей. А. В. Лисицина – талантливый, увлеченный научными исследованиями творческий и доброжелательный человек, который обладает высокой художественной культурой.

В 1995 г. с красным дипломом она окончила архитектурный факультет НГАСА по специальности «Архитектура». С 1995 по 2005 гг. работала архитектором в МП ИРГ «НижегородгражданНИИпроект».

С 2005 г. работает на кафедре архитектурного проектирования ННГАСУ после защиты кандидатской диссертации. В 2020 году она успешно защитила докторскую диссертацию по специальности «Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия».

Александра Владиславовна – замечательный лектор. В настоящее время она читает лекционные курсы по дисциплинам «Теория архитектуры», «Современные проблемы истории и теории архитектуры, градостроительства и дизайна», «Историко-архитектурная среда малых и средних городов Нижегородского Поволжья» для студентов по направлениям подготовки «Архитектура» и «Дизайн архитектурной среды». На высоком профессиональном уровне ведет практические занятия по дисциплине «Архитектурное проектирование» на 3–5 курсах. Руководит ВКР бакалавра и магистра архитектуры, семь из которых отмечены дипломами I степени МООСАО на Международных смотрах-конкурсах выпускных квалификационных работ по

архитектуре, дизайну и искусству. Неоднократно награждалась дипломами МООСАО «За творческое и педагогическое мастерство». Осуществляет руководство аспирантами.

С 2025 г. ученый секретарь совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 24.2.343.01 на базе ННГАСУ.

Она автор более 130 научных публикаций по архитектуре малых и средних городов Нижегородского Поволжья, а также соавтор и ответственный редактор коллективных монографий – иллюстрированных каталогов объектов культурного наследия городов и районов Нижегородской области (2011–2025).

Автор монографии «Портрет времени: Архитектура города Богородска Нижегородской области (2008), автор историко-архитектурных путеводителей по Городцу (2024) и Балахне (2026) а также – участник более 60 научных и научно-практических конференций.

А. В. Лисицына ведет практическую работу в Архитектурной мастерской ННГАСУ, занимая должность главного архитектора проектов (по совместительству). При ее участии в 2007–2025 гг. выполнено более 70 научно-исследовательских и научно-проектных работ.

Редакция «Приволжского научного журнала» и коллеги от всей души поздравляют уважаемую Александру Владиславовну, замечательного ученого, педагога и практика с юбилеем и желают ей вдохновения и дальнейших творческих и научных успехов.

ЮБИЛЕЙ ПРОФЕССОРА ННГАСУ ОРЕЛЬСКОЙ ОЛЬГИ ВЛАДИМИРОВНЫ



13 июня 2026 года свой юбилей отметила доктор архитектуры, профессор, член-корреспондент РААСН, член Союза архитекторов России профессор кафедры архитектурного проектирования ННГАСУ, член совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук, 24.2.343.01, созданного на базе ННГАСУ, известный ученый и историк архитектуры – Ольга Владимировна Орельская.

Ольга Владимировна – замечательный педагог. На протяжении 50 лет на самом высоком профессиональном уровне читает авторские курсы лекций по истории и теории современной архитектуры Нижнего Новгорода, России и зарубежной архитектуры. Под руководством Ольги Владимировны было успешно защищено более 12 диссертаций кандидатов и докторов архитектуры. Лауреат ежегодных международных смотров-конкурсов МООСАО за творческое педагогическое мастерство. Квалификационные работы ее выпускников ежегодно отмечаются дипломами 1 степени и дипломами РААСН, САР, МАСА.

Она автор 28 книг, посвященных истории архитектуры и мастерам нижегородской архитектуры, историческим улицам, которые стали архитектурной энциклопедией города. Многие памятники Нижнего Новгорода и Нижегородской области выявлены Ольгой Владимировной и включены в списки объектов культурного наследия, ею разработан ряд проектов историко-культурных опорных планов, охранных зон, вошедших в историко-архитектурный опорный план Нижнего Новгорода.

Ольга Владимировна является членом Диссертационного совета при ННГАСУ, экспертом РААСН и РАН по НИР Минстроя РФ, а также членом научного совета

РААСН по историко-теоретическим проблемам архитектуры и градостроительства, редакционного совета журналов «*ACADEMIA*. Архитектура и строительство» и «Жилищное строительство».

Заслуги Орельской О. В. перед архитектурной наукой и образованием неоднократно отмечены наградами: нагрудным знаком «Почетный работник высшего профессионального образования РФ», медалью Российского Союза исторических городов и регионов «За вклад в наследие народов России», медалью РААСН за монографию «Архитектура эпохи модерна в Нижнем Новгороде», Золотым Дипломом «Зодчество-2005» и «Золотым знаком» «Зодчество-2021»; Серебряной медалью РААСН.

Ольга Владимировна пять раз удостоена звания «Лауреат Премии города Нижнего Новгорода», награждена медалями Союза архитекторов России: имени академика А. В. Иконникова «За выдающийся вклад в архитектурную науку», имени академика И. В. Жолтовского «За выдающийся вклад в архитектурное образование».

Редакция «Приволжского научного журнала» и коллеги от всей души поздравляют уважаемую Ольгу Владимировну, замечательного ученого, историка архитектуры с юбилеем и желают ей крепкого здоровья, благополучия и успехов и вдохновения во всех сферах деятельности.

ЮБИЛЕЙ ПРОФЕССОРА ННГАСУ КОЧЕВА АЛЕКСЕЯ ГЕННАДЬЕВИЧА



18 июня 2026 года свой юбилей отметил доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН, почетный работник высшего профессионального образования РФ, заведующий кафедрой теплогазоснабжения, член совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук, 24.2.343.01, созданного на базе ННГАСУ, известный ученый и инженер – Кочев Алексей Геннадьевич.

За более чем 30-летний стаж работы в ННГАСУ не осталось, пожалуй, ни одной дисциплины в области теплогазоснабжения и вентиляции, которую бы не вел Алексей Геннадьевич, причем, на высочайшем профессиональном уровне.

Особое место в его научной деятельности занимает микроклимат православных храмов, где эффективность и достоверность его исследований неоднократно подтверждались и нашли свое воплощение при архитектурно-художественной реконструкции, восстановлении храмов и инженерных систем для повышения надежности и обеспечения параметров микроклимата таких известных нижегородских храмов, как Кафедральный Собор во имя Святого Благоверного Князя Александра Невского и Церковь Собора Пресвятой Богородицы (Рождественская церковь), и множества других, чья география выходит за пределы Нижегородской области.

Алексеем Геннадьевичем были опубликованы более 250 научных и учебно-методических работ, включая нормативные источники, несколько монографий и патентов РФ на изобретение. Он подготовил к защите одного докторанта и 7 кандидатов наук.

Среди наград Алексея Геннадьевича более 10 дипломов и почетных грамот от Министерства образования Российской Федерации, Министерства образования Нижегородской области, Министерства строительства Нижегородской области,

Министерства экологии и природных ресурсов Нижегородской области, губернатора Нижегородской области.

Алексей Геннадьевич является членом диссертационных советов Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета, Тюменского индустриального университета, а также членом редакционной коллегии рецензируемых журналов из перечня ВАК: «АВОК», «Известия КазГАСУ».

Редакция «Приволжского научного журнала» и коллеги от всей души поздравляют уважаемого Алексея Геннадьевича, замечательного ученого и инженера с юбилеем и желают ему крепкого здоровья, благополучия, успехов и вдохновения во всех сферах деятельности.

УДК 624.072.2

В. В. БЕЛОВ¹, д-р техн. наук, гл. эксперт по строительной части;
А. Л. БАЛУШКИН², канд. техн. наук, доц. института инженеров
строительства и транспорта

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ КРИТИЧЕСКОЙ НАКЛОННОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. ЧАСТЬ I

¹АО «Атомэнергопроект».

Россия, 197183, Санкт-Петербург, ул. Савушкина, д. 82.

Тел.: (921) 920-24-01, эл. почта: VVBelov@spbaer.ru

²ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет».

Россия, 150025, г. Ярославль, Московский пр-т, д. 88.

Тел.: (903) 638-12-55, эл. почта: albalush@mail.ru

Ключевые слова: поперечный изгиб, критическая наклонная трещина, сцепление, продольные и поперечные смещения.

В статье предложен метод расчета предельных состояний железобетонных элементов при поперечном изгибе. В основу положена модель критической наклонной трещины, разделяющей элемент на блоки. Разрешающая система алгебраических уравнений получена с учетом особенностей взаимодействия смежных блоков по сохраняющему сплошность бетону, а также по пересекающим трещину стержням продольной и поперечной арматуры.

Введение

Необходимость совершенствования методов прогнозирования механической безопасности железобетонных элементов (ЖБЭ), работающих в условиях поперечного изгиба при доминировании поперечных сил, сохраняется, несмотря на многолетний опыт их исследования, проектирования и эксплуатации. Актуальность таких расчетов повышается при необходимости учета особых воздействий (в соответствии с СП 296.1325800.2017 «Здания и сооружения. Особые воздействия»).

Вопросам прочности ЖБЭ по наклонным сечениям посвящено значительное число работ как отечественных [1–5], так и зарубежных исследователей [6–9]. Среди исследований, опубликованных в последние десятилетия, можно отметить те, авторами которых являются: А. С. Залесов, [1, 2], Ю. А. Климов [2], С. Б. Крылов, В. И. Травуш [3], И. Н. Старишко [4], Т. А. Мухамедиев, С. А. Зенин [5], E. C. Bentz, F. J. Vecchio, M. P. Collins [9].

В данной работе предлагается обобщающий имеющийся опыт расчетная модель исследовательского характера, предназначенная для детальной и методологически единой оценки прочности и жесткости ЖБЭ в целях оптимизации их конструктивных решений при расширенных сочетаниях силовых факторов, а также уточнения инженерных методов расчета.

Материалы и методы

Критической наклонной трещиной (КНТ) будем называть область локализации разрушения железобетонного элемента в процессе его разделения на

части в условиях плоского поперечного изгиба. Область применения модели составляют статически нагруженные нетрещиностойкие элементы, для которых до образования краевых трещин справедлива гипотеза плоских сечений, с симметричными относительно плоскости изгиба поперечным сечением, схемами продольного, а также (при наличии) поперечного и наклонного армирования. В общем случае в зоне КНТ действуют изгибающий момент M , поперечное усилие Q и продольное усилие N (при $N \neq 0, M/N \geq h/2$, где h – высота сечения элемента).

Расчетная траектория КНТ моделируется трехзвенной ломаной линией $ABCD$ (рис. 1), состоящей из:

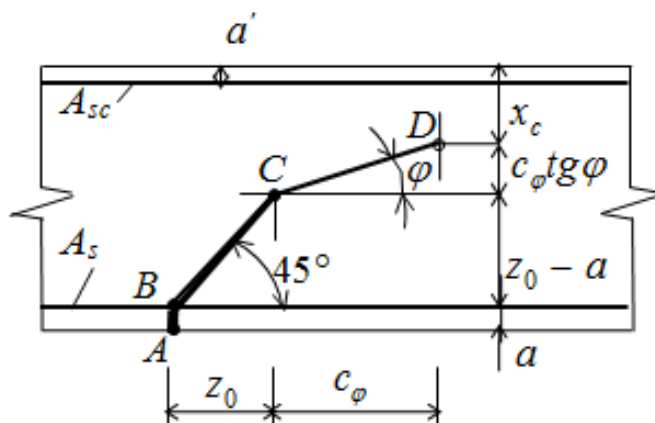


Рис. 1. Расчетная траектория КНТ

1) краевого участка AB , нормального к продольной оси элемента в пределах защитного слоя бетона a для растянутой арматуры A_s (ориентация определяется положением главных площадок в момент трещинообразования в точке A);

2) среднего участка BC от растянутого арматурного пояса до нейтральной линии в момент трещинообразования, расположенной на расстоянии z_0 от крайнего растянутого волокна, с углом наклона 45° к продольной оси элемента в соответствии с ориентацией главных площадок в момент трещинообразования в точке C ;

3) участка CD при вершине КНТ в точке D , имеющего угол наклона φ к продольной оси элемента и длину проекции c_φ , подлежащие определению.

В рамках кинематической гипотезы рассматриваются две компоненты взаимных смещений бортов КНТ: 1) продольное смещение U вдоль оси ЖБЭ (ширина раскрытия КНТ) и 2) поперечное смещение V по нормали к оси ЖБЭ (сдвиг КНТ). Условия совместности деформаций в КНТ определяются суперпозицией взаимных смещений, обусловленных действием внутренних усилий M, N и Q :

$$\begin{cases} U(\xi) = U_M(\xi) - U_N \geq 0, \\ V(\xi) = V_M(\xi) - V_Q. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь для продольных U_M и поперечных V_M смещений за счет изгибающего момента M (рис. 2) из геометрических соображений имеем:

– на участке CD , $0 \leq \xi \leq c_\varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi$

$$\begin{cases} U_M(\xi) = \xi \operatorname{tg}(\varphi + \frac{\alpha_M}{2}) \left[\frac{\sin(\varphi + \alpha_M)}{\sin \varphi} - 1 \right], \\ V_M(\xi) = \xi \left[\frac{\sin(\varphi + \alpha_M)}{\sin \varphi} - 1 \right], \end{cases} \quad (2)$$

– на участке BC , $c_\varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi \leq \xi \leq z_0 - a$

$$\begin{cases} U_M(\xi) = \xi \operatorname{tg}(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha_M}{2}) \left[\sqrt{2} \sin(\frac{\pi}{4} + \alpha_M) - 1 \right], \\ V_M(\xi) = \xi \left[\sqrt{2} \sin(\frac{\pi}{4} + \alpha_M) - 1 \right], \end{cases} \quad (3)$$

где α_M – искомый угол взаимного поворота смежных блоков вокруг оси, проходящей через вершину КНТ.

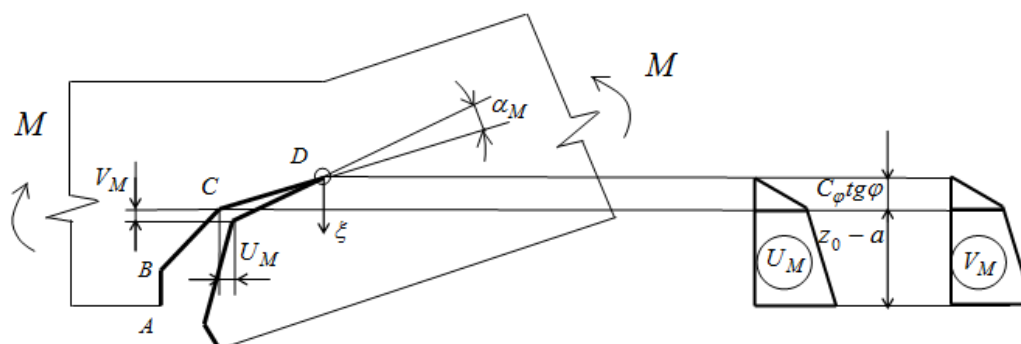


Рис. 2. Взаимный поворот блоков

Искомые продольное смещение U_N за счет действия продольного усилия N и поперечное смещение V_Q за счет поперечного усилия Q принимаются постоянными по высоте КНТ. При этом фактическая изменчивость параметров U_N и V_Q в малой окрестности вершины КНТ, а также «моментные» компоненты смещений U_M, V_M на краевом участке AB во внимание не принимаются, так как не оказывают влияния на решение задачи.

Для продольных U_s и поперечных V_s смещений в КНТ продольной арматуры A_s , а также продольные U_{swi} и поперечные V_{swi} смещения в КНТ поперечной арматуры A_{swi} , определяются зависимостями (1) в точках пересечения с КНТ соответствующих арматурных стержней.

Статическую схему КНТ составляют (рис. 3) (для упрощения здесь и далее рассматриваются элементы прямоугольного профиля шириной b при отсутствии наклонной арматуры):

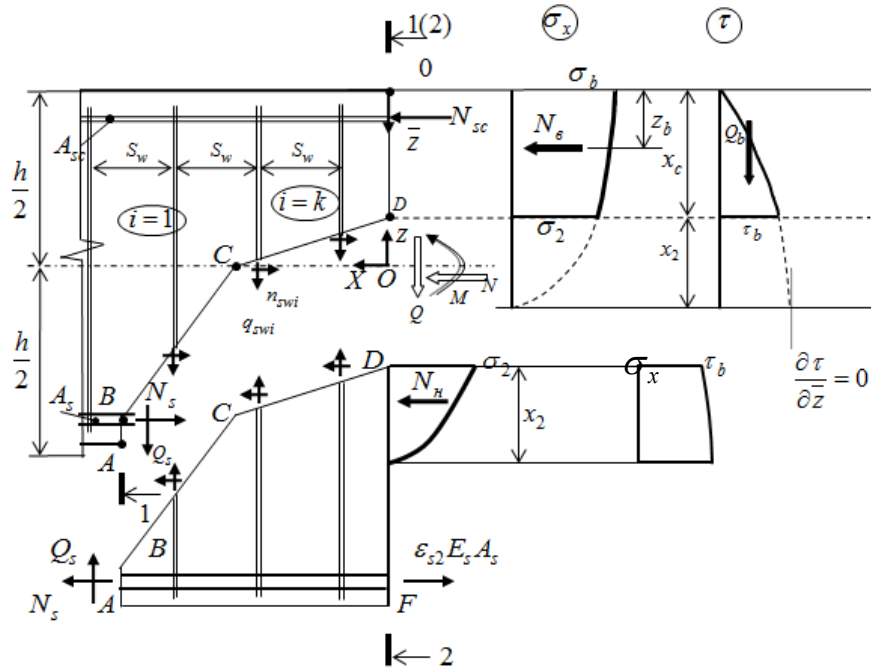


Рис. 3. Статическая схема КНТ

– продольное N_b и поперечное Q_b усилия в сохраняющем сплошность бетоне. При этом в сечении 2-2 распределение сжимающих нормальных напряжений σ_x принимается по квадратной параболе:

$$\sigma_x(\bar{z}) = \sigma_b \left[1 - \frac{\bar{z}^2}{(x_c + x_2)^2} \right], \quad \bar{z} = \frac{h}{2} - z. \quad (4)$$

Для касательных напряжений в сжатой зоне сечения 2-2 также принимается параболическая зависимость, но с максимумом под вершиной КНТ:

$$\tau(\bar{z}) = \frac{\tau_b}{x_c(x_c + 2x_2)} [2(x_c + x_2) - \bar{z}] \cdot \bar{z}; \quad (5)$$

– осевое усилие $N_{sc} = \varepsilon_{sc} E_s A_{sc}$ в арматурной ветви A_{sc} сжатой зоны определяется с учетом совместности деформирования с бетоном и (4), т. е. при

$$\varepsilon_{sc} = \frac{\sigma_b}{E_b(\varepsilon_b)} \left(1 - \frac{(a')^2}{(x_c + x_2)^2} \right); \quad (6)$$

– осевое усилие в растянутой продольной арматуре A_s –

$$N_s = \varepsilon_s E_s A_s; \quad (7)$$

– осевые усилия в каждом i – стержне поперечной арматуры, пересекаемой



КНТ –

$$q_{swi} = \varepsilon_{swi} E_{sw} A_{swi}, \quad i = 1, \dots, k. \quad (8)$$

При этом в запас прочности принимается самое неблагоприятное положение поперечных стержней по длине КНТ – наиболее нагруженный стержень $i = 1$ отстоит от устья КНТ (точка A) на расстоянии шага s_w поперечной арматуры. Следующие поперечные стержни $i = 2, \dots, k$ располагаются по длине проекции КНТ с регулярным шагом s_w .

– поперечное (нагельное) усилие Q_s в продольной растянутой арматуре и поперечные нагельные усилия n_{swi} ($i = 1, \dots, k$) в стержнях поперечной арматуры, пересекаемых КНТ в точках с координатами z_{wi} .

Работой бетона на растяжение и сдвиг в зоне раскрытия КНТ в запас прочности пренебрегается.

В формулах (4)–(8) используются следующие условные обозначения:

$x_c = h - z_0 - c_\phi \tan \phi$ – высота сжатой зоны над вершиной КНТ;

x_2 – высота сжатой зоны бетона под вершиной КНТ;

σ_b – нормальное напряжение крайнего сжатого волокна бетона;

τ_b – касательное напряжение в бетоне на уровне вершины КНТ;

ε_{sc} – деформация укорочения продольной арматуры A_{sc} над вершиной КНТ;

ε_s – относительная деформация растянутой продольной арматуры A_s в КНТ;

A_s, A_{sc} – площади сечения растянутой и сжатой продольной арматуры;

E_s, E_{sw} – модули упругости продольной и поперечной арматуры;

$E_b(\varepsilon)$ – модуль деформации сжатого бетона;

a' – расстояние от верхней грани до центра тяжести арматуры A_{sc} ;

A_{swi} – площадь сечения i -го стержня поперечной арматуры;

ε_{swi} – относительная деформация i -го стержня поперечной арматуры;

$k = \left\lfloor \frac{z_0 + c_\phi}{s_w} \right\rfloor$ – общее количество пересекаемых КНТ поперечных стержней,

где $\lfloor \cdot \rfloor$ – знак округления до ближайшего меньшего целого числа.

Предполагая для упрощения отсутствие внешних нагрузок в пределах КНТ, уравнения равновесия в КНТ записываются в виде:

$$\begin{cases} N = N_b + N_{sc} - N_s - \sum_{i=1}^k n_{swi}, \\ N\left(\frac{h}{2} - a\right) + M = N_b z_b - Q_b(z_0 - a + c_\varphi) + N_{sc}(h_0 - a') - \\ - \sum_{i=1}^k i \cdot q_{swi} \cdot s_w \pm \sum_{i=1}^k n_{swi} \left(\frac{h}{2} - a + z_{wi}\right), \\ Q = Q_b + \sum_{i=1}^k q_{swi} + Q_s \end{cases} \quad (9)$$

где $h_0 = h - a$, а при отсутствии поперечной арматуры $A_{sw} = 0, q_{sw} = n_{sw} = 0$.

Высота сжатой зоны x_2 под вершиной КНТ определяется из условия равновесия продольных сил в блоке $ABCDF$ (рис. 3):

$$N - N_b - N_{sc} = E_s A_s (\varepsilon_s - \varepsilon_{s2}) + N_H + \sum_{i=1}^k n_{swi}, \quad (10)$$

где ε_{s2} – относительная деформация удлинения продольной арматуры A_s в сечении 2-2;

N_H – равнодействующая сжимающих напряжений под вершиной КНТ.

Для определения же наибольшего сжимающего напряжения σ_b и деформации арматуры ε_{s2} дополнительно рассматриваются условия равновесия в нормальном сечении 2–2, проведенном через вершину КНТ (рис.3), которые без учета вклада трещиноватого растянутого бетона, имеют вид:

$$\begin{cases} N = N_{b2} - N_{sc} - \varepsilon_{s2} E_s A_s, \\ N\left(\frac{h}{2} - a\right) + M = N_{b2} \left[h_0 - \frac{3}{8}(x_c + x_2) \right] + N_{sc}(h_0 - a') \end{cases} \quad (11)$$

где $N_{b2} = N_b + N_H = \frac{2}{3} \sigma_b b (x_c + x_2)$.

Касательное напряжение τ_b на уровне вершины КНТ определяется из условия стабилизации положения вершины, при рассматриваемом уровне внешней нагрузки, когда главные растягивающие напряжения в точке D достигают прочности бетона при растяжении $\sigma_{mt} = R_{bt}$. Тогда, принимая угол поворота главных площадок в вершине КНТ равным углу наклона φ ее привершинного участка CD , с учетом:

$$\sigma_z = \sigma_x - \frac{2\tau_b}{\operatorname{tg} 2\varphi}, \quad (12)$$

где в соответствии с (4) $\sigma_x = \sigma_b \cdot \left[1 - \frac{x_c^2}{(x_c + x_2)^2} \right]$,

для касательного напряжения τ_b имеем выражение:

$$\frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_b^2} = R_{bt}. \quad (13)$$

Взаимосвязь кинематических и силовых параметров задачи устанавливается соотношениями осевых смещений и относительных деформаций арматурных элементов в их пересечениях с КНТ. Учитывается, что осевые смещения арматуры относительно противолежащих (оппозитных) бортов КНТ в сумме равны соответствующему взаимному смещению бортов КНТ $u_{sP} + u_{sG} = U_s$, $u_{sw,P} + u_{sw,G} = V_{sw}$, а деформации арматуры в трещине имеют градиент по ширине ее раскрытия $\varepsilon_{sP} \neq \varepsilon_{sG}$, $\varepsilon_{sw,P} \neq \varepsilon_{sw,G}$ (рис. 4).

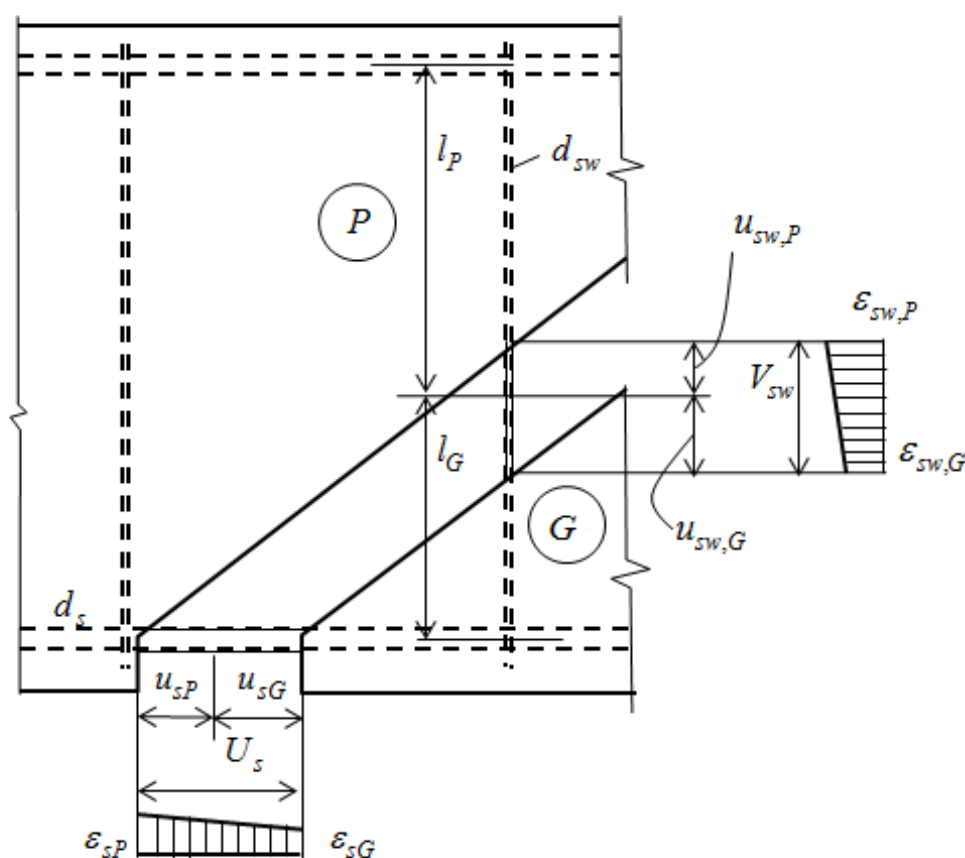


Рис. 4. Осевые смещения и относительные удлинения арматурных элементов в их пересечениях с КНТ

При этом применяется локальный закон сцепления арматуры с бетоном, представленный на рис. 5 [10]. Здесь τ_{cy} – касательные напряжения сцепления арматуры с бетоном; $g = u_s - u_{bt}$ – смещения арматуры относительно бетона при перемещениях арматуры u_s и бетонной обоймы u_{bt} . На упругой стадии сцепления I используется степенная зависимость $\tau - g$:

$$\tau_{cy}(g) = \tau_R \left(\frac{g}{g_R} \right)^{0.4}, \quad (14)$$

где $\tau_R = 2.5\sqrt{R_b}$, МПа – прочность сцепления и $g_R \cong u_R = 1.0$ мм – предельное упругое смещение.

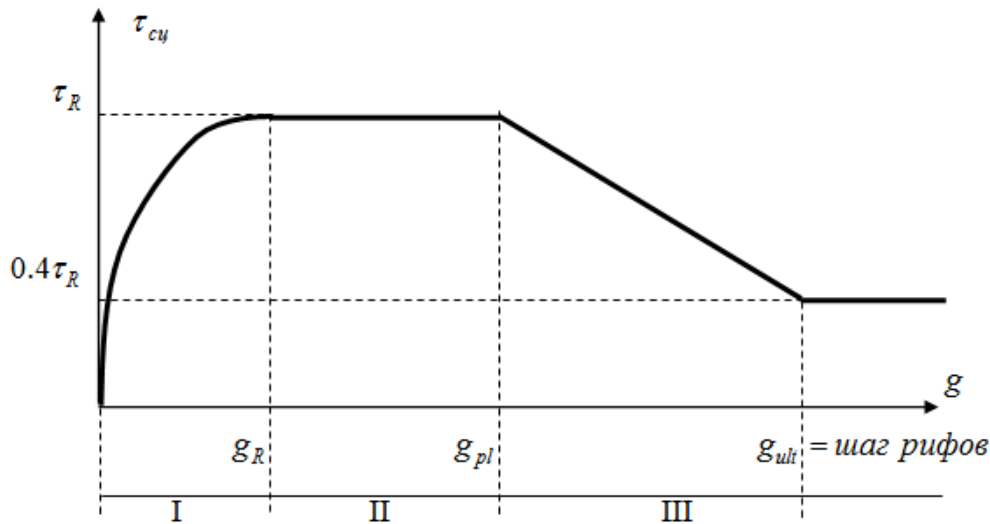


Рис. 5. Зависимость $\tau_{cy} - g$

Завершение «пластической» стадии II принимается при смещениях $g_{pl} \cong u_{pl} = 2.0$ мм. Нисходящую ветвь диаграммы $\tau - g$ (стадия III) целесообразно рассматривать только при оценке живучести конструктивных систем.

На стадии «упругого» сцепления для каждого арматурного элемента, пересекаемого КНТ, унифицированно используются три «типовых» соотношения между относительными деформациями ε_s , ε_{sl} и перемещениями арматуры u_s , u_{sl} (рис. 6), полученные с использованием результатов [11] и уравнения равновесия арматуры при ее смещении относительно бетона:

$$1) \Phi_1(\varepsilon_s, \varepsilon_{sl}, u_s, u_{sl}) = 0$$

$$\left[(1 + \alpha_E \mu) \varepsilon_{sl} - \alpha_E \mu \varepsilon_s \right]^2 - \varepsilon_s^2 = Y \cdot (u_{sl}^{1.4} - u_s^{1.4}), \quad (15)$$

где $\alpha_E = E_s / E_b$ – коэффициент приведения;

μ – коэффициент армирования;

E_s, E_b – модули упругости арматуры и бетона,

$$Y = \frac{8(1 + \alpha_E \mu)}{1.4 E_s d_{s(sw)}} \cdot \frac{\tau_R}{u_R^{0.4}};$$

$$2) \Phi_2(\varepsilon_s, u_s, u_{sl}) = 0$$

$$u_{sl} = \frac{1}{Y \cdot t_a} \left\{ \left[\sqrt{Y \left(\frac{\varepsilon_s^2}{Y} - u_s^{1.4} + t_a u_s - t_b \right)} - \frac{t_a l Y}{2} \right]^2 - \varepsilon_s^2 + Y \cdot u_s^{1.4} + Y \cdot t_b \right\}, \quad (16)$$

где $t_a = 0.8057[\text{ед.длины}]^{0.4}$ и $t_b = 0.0416[\text{ед.длины}]^{1.4}$ – размерные коэффициенты аппроксимирующей функции $g^{1.4}(\zeta) = t_a \cdot \zeta - t_b$, использованной при интегрировании выражения $l = \int_{g_l}^g \frac{dg}{\sqrt{\varepsilon_s^2 - Y[g^{1.4} - (g(\zeta))^{1.4}]}}$;

$$3) \Phi_3(\varepsilon_s, \varepsilon_{sl}, u_s, u_{sl}) = 0$$

$$(\varepsilon_s - \varepsilon_{sl})E_s = \frac{4l}{d_{s(sw)}} \cdot \frac{\varepsilon_{sl} \cdot \tau_R \cdot \left(u_s^{0.4} + \frac{\varepsilon_{sl}}{\varepsilon_s} u_{sl}^{0.4} \right)}{(\varepsilon_s + \varepsilon_{sl}) \cdot u_R^{0.4}}, \quad (17)$$

где эпюра касательных напряжений τ_{cu} на участке l аппроксимируется функцией

$$\tau_{cu}(\zeta) = \tau_{sl} + (\tau_s - \tau_{sl}) \cdot \left(1 - \frac{\zeta}{l} \right)^{\frac{\varepsilon_{sl}}{\varepsilon_s}}.$$

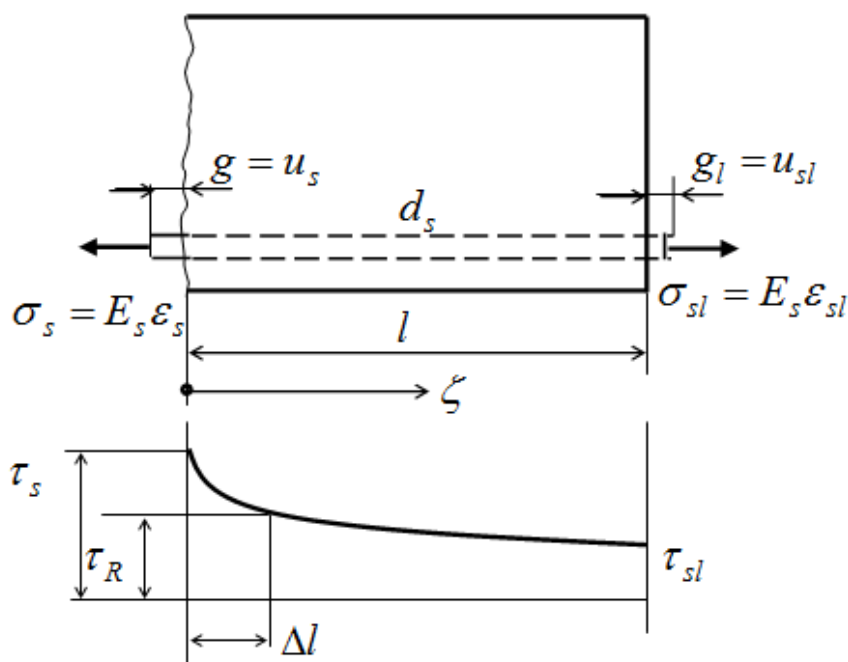


Рис. 6. Эпюра касательных напряжений сцепления на участке l

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Расчет железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям / А. С. Залесов, И. К. Никитин, Л. Л. Лемыш, Э. Н. Кодыш. – Москва : Стройиздат, 1988. – 320 с. – ISBN 5-274-00085-1.



2. Залесов, А. С. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил / А. С. Залесов, Ю. А. Климов. – Киев : Будивельник, 1989. – 104 с. – ISBN 5-7705-0187-1.
3. Крылов, С. Б. Модель прочности наклонных сечений балок произвольной формы / С. Б. Крылов, В. И. Травуш, А. С. Крылов // Вестник НИЦ «Строительство». – Москва, 2020. – № 4 (27). – С. 46–64.
4. Старишко, И. Н. Новое направление по расчету прочности изгибаемых железобетонных элементов по наклонным сечениям с примером расчета опытной балки / И. Н. Старишко // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. – 2021. – № 5 (17). – Р. 479–499.
5. Мухамедиев, Т. А. Оценка надежности метода расчета прочности наклонных сечений железобетонных элементов с различной формой поперечного сечения / Т. А. Мухамедиев, С. А. Зенин, А. С. Жарких // Вестник НИЦ «Строительство». – Москва, 2022. – № 33 (2). – С. 139–149.
6. Leonhardt, F. The Stuttgart shear tests, 1961 / F. Leonhardt, R. Walther. – London : Cement and Concrete Association, 1961. – 134 p.
7. Kani, G. N. J. The riddle of shear failure and its solution / G. N. J. Kani // ACI Journal. – 1964. – № 61. – P. 441–467.
8. Fenwick, R. C. Mechanisms of shear resistance of concrete beams / R. C. Fenwick, T. Paulay // Journal of the Structural Division. – 1968. – № 10 (94). – P. 2325–2350.
9. Bentz, E. C. Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements / E. C. Bentz, F. J. Vecchio, M. P. Collins // ACI Structural Journal. – 2006. – P. 614–624.
10. Model Code for Concrete Structures / CEB-FIP. – English : Ernst & Sohn, 2010. – Vol. 1. – 432 p.
11. Холмянский, М. М. Контакт арматуры с бетоном / М. М. Холмянский. – Москва : Стройиздат, 1981. – 184 с.

BELOV Vyacheslav Vyacheslavovich¹ doctor of technical sciences, chief expert on construction; BALUSHKIN Aleksandr Leonidovich², candidate of technical sciences, associate professor of the chair of construction of buildings and structures

CALCULATION MODEL OF CRITICAL INCLINED CRACK UNDER TRANSVERSE BENDING OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS. PART I

¹Atomenergoproekt JSC.

82, Savushkina St., Saint Petersburg, 197183, Russia.

Tel.: (921) 920 24 01, e-mail: VVBelov@spbaep.ru

²Yaroslavl State Technical University.

88, Moskovsky Prospect, Yaroslavl, 150023, Russia.

Tel.: (4852) 44-36-61; (903) 638-12-55; e-mail: albalush@mail.ru

Key words: transverse bending, critical inclined crack, bond, longitudinal and transverse displacements.

This article proposes a method for calculating the ultimate limit states of reinforced concrete elements under transverse bending. It is based on a model of a critical inclined crack dividing the element into blocks. A resolving system of algebraic equations is derived taking into account the interactions between adjacent blocks along the concrete that maintains continuity, as well as along the longitudinal and transverse reinforcement bars that intersect the crack.



REFERENCES

1. Zalesov A. S., Nikitin I. K., Lemysh L. L., Kodysh E. N. Raschet zhelezobetonnykh konstruktsiy po prochnosti, treshchinostoikosti i deformatsiyam [Calculation of reinforced concrete structures for strength, crack resistance and deformations]. Moscow, Stroyizdat, 1988, 320 p.
2. Zalesov A. S., Klimov Yu. A. Prochnost zhelezobetonnykh konstruktsiy pri deistvii poperechnykh sil [Strength of reinforced concrete structures under the action of transverse forces]. Kyiv, Budivelnik, 1989, 104 p.
3. Krylov S. B., Travush V. I., Krylov A. S. Model prochnosti naklonnykh secheniy balok proizvolnoy formy [Strength model of inclined sections of beams of arbitrary shape]. Vestnik NITS Stroitelstvo [Bulletin of the Scientific Research Center of Construction]. Moscow, 2020, № 4 (27), P. 46–64.
4. Starishko I. N. Novoe napravlenie po raschetu prochnosti izгибаемых zhelezobetonnykh ehlementov po naklonnym secheniyam s primerom rascheta opytной balki [A new approach to calculating the strength of flexural reinforced concrete elements on inclined sections with an example of calculating an experimental beam]. Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. Moscow, 2021, № 5 (17), P. 479–499.
5. Mukhamediev T. A., Zenin S. A., Zharkikh A. S. Otsenka nadezhnosti metoda rascheta prochnosti naklonnykh secheniy zhelezobetonnykh ehlementov s razlichnoy formoy poperechnogo secheniya [Evaluation of the reliability of the method for calculating the strength of inclined sections of reinforced concrete elements with different cross-sectional shapes]. Vestnik NITS Stroitelstvo [Bulletin of the Scientific Research Center of Construction]. 2022, № 33 (2), P. 139–149.
6. Leonhardt F. Walther R. The Stuttgart shear tests. London. Cement and Concrete Association, 1961, 134 p.
7. Kani G.N.J. The riddle of shear failure and its solution. ACI Journal. 1964, № 61, P. 441–467.
8. Fenwick R.C., Paulay T. Mechanisms of shear resistance of concrete beams. Journal of the Structural Division. 1968, № 10 (94), P. 2325–2350.
9. Bentz E. C., Vecchio F. J., Collins M. P. Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements. ACI Structural Journal. 2006, P. 614–624.
10. Model Code for Concrete Structures. CEB-FIP. Ernst & Sohn, 2010, Vol. 1, 432 p.
11. Kholmyanskiy M. M. Kontakt armatury s betonom [Contact of reinforcement with concrete]. Moscow, Stroyizdat, 1981, 184 p.

© В. В. Белов, А. Л. Балушкин, 2026

Получено: 19.12.2025 г.



УДК 624.012.4

А. А. ВЕДЕРНИКОВА, канд. техн. наук, и. о. зав. кафедрой технологий информационного и математического моделирования

ПРОЦЕСС ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ В ПРЕДЕЛЬНЫХ И ЗАПРЕДЕЛЬНЫХ СТАДИЯХ РАБОТЫ

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Тел.: (904) 605-65-88; эл. почта: alena@avedernikova.ru

Ключевые слова: трубобетонные конструкции, ТБК, обратный численно-аналитический метод, трубобетонные элементы.

В статье приводятся результаты сопоставления экспериментальных данных трубобетонных элементов конструкций, выполненных в разное время, с результатами расчета обратным численно-аналитическим методом. Данные приводятся как для предельной, так и запредельной работы в виде графиков деформирования конструкций под нагрузкой.

Введение

Целью данной работы является демонстрация возможностей обратного численно-аналитического метода применительно к сжатым с эксцентриситетом трубобетонным элементам конструкций, находящихся в предельных и запредельных стадиях работы.

Трубобетонные конструкции применяются в уникальных зданиях и сооружениях, например, в г. Санкт-Петербурге построено здание АО «Банк Санкт-Петербург» высотой 22 этажа с применением трубобетонных колонн [1], а в г. Гуанчжоу, Китай – телебашня “Canton Tower” высотой 600 м [2], несущий остов которой выполнен из трубобетонных элементов. Для таких зданий расчеты выполняются с учетом нормальных условий эксплуатации и аварийных ситуаций, которые могут привести к прогрессирующему обрушению. Интерес представляет возможность получить данные о напряженно-деформированном состоянии (НДС) элементов здания при различных уровнях развития деформаций, в том числе, превышающих предельные. Обратный метод расчета позволяет определять НДС и остаточную несущую способность, в том числе в запредельной стадии работы за счет оригинального подхода [3–5].

Анализ и методы исследования

Особенностью обратного численно-аналитического метода является обратная последовательность расчета, который ведется по приращению деформированных состояний, задаваемых в виде относительной деформации наиболее напряженного волокна. Напряженно-деформированное состояние и внутренние усилия в сечении трубобетонного элемента определяются на основе гипотезы плоских сечений и унифицированных диаграмм работы материалов

(по СП 63.13330.2016¹ и СП 16.13330.2017²). Из равенства внутренних и внешних сил определяются значения продольных сил и изгибающих моментов, действующих в сечении. Таким образом определяется прочность нормальных сечений. При расчете устойчивости учитывается развитие поперечных перемещений, которые определяются аналитически. Деформированные состояния наиболее нагруженного сечения задаются с учетом деформационных моментов, возникающих вследствие развития перемещений.

СП 385³ устанавливает предельные деформации для стали $\varepsilon_{s,lim}$ равными 0,025 и 0,01 (с физическим и условным пределом текучести). Для бетонов средней прочности установлены относительные предельные деформации равные $\varepsilon_{b,lim} = 0,0035$. СП 266⁴ задает предел для деформаций по формуле:

$$|\varepsilon_b| \leq \varepsilon_{b2};$$

где $\varepsilon_{b2} = 0,0035$.

В этом случае при превышении предельных деформаций для бетона и выключении бетона из работы трубобетонный элемент все еще обладает некоторым уровнем несущей способности за счет работы стальной трубы, что заметно и в ходе экспериментальных исследований, например, в работах *K. Cederwall* [6], *G. Muciaccia* [7].

Работа трубобетонного элемента условно может быть разбита на стадии до и после развития предельных деформаций. Точка перехода между этими состояниями будет фактическим параметром несущей способности (см. рис. 1), а точки, принадлежащие нисходящей кривой, будут соответствовать остаточной несущей способности (запредельной работе).

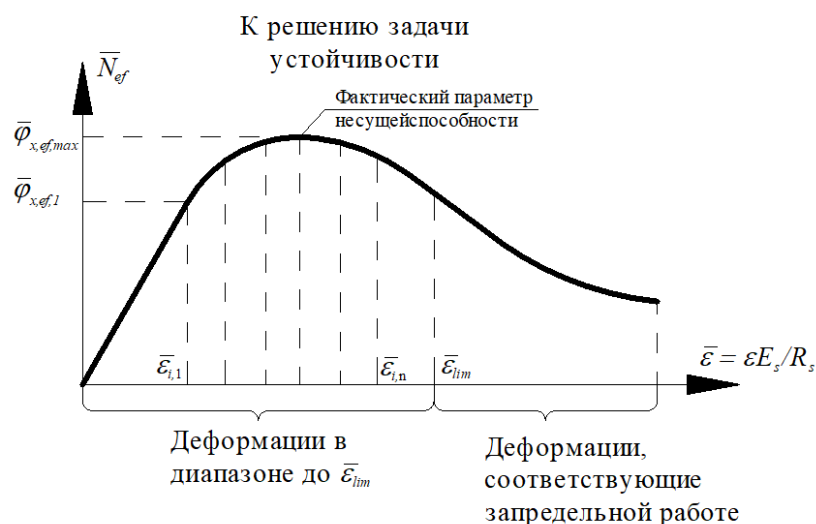


Рис. 1. Определение параметра фактической несущей способности

¹ СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. М.: Минстрой России. 2015. 168 с.

² СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. М.: Минстрой России, 2017. 148 с.

³ СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. М.: Стандартинформ. 2018. 24 с.

⁴ СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования. М.: Стандартинформ. 2016. 78 с.



Таким образом, можно задаваться нужным уровнем относительных деформаций в зависимости от решаемой задачи.

Результаты исследования. Сопоставление с данными экспериментов, проведенных зарубежными учеными

Для сопоставления выбраны имеющиеся в публикациях [6, 8–10] данные по графикам «прогиб-нагрузка». Выбор именно этой зависимости обусловлен тем, что приводится для большого количества экспериментальных образцов. Показатели снимались во время испытаний трубобетонных элементов. Данные по характеристикам трубобетонных элементов приведены в табл.

Таблица

Экспериментальные данные

| № стержня | H , мм | B , мм | t , мм | e_{0x} , мм | L , мм | R_s , МПа | R_b , МПа | E_b , МПа | $N_{\text{эксп}}$, кН |
|---------------------------------------|----------|----------|----------|---------------|----------|-------------|-------------|-------------|------------------------|
| <i>H. Shakir-Khalil, J. Zegnische</i> | | | | | | | | | |
| 1 | 80 | 120 | 5 | 16 | 2940 | 384,7 | 44 | 34000 | 260 |
| 2 | 80 | 120 | 5 | 40 | 2940 | 343,3 | 43 | 34000 | 210 |
| <i>R.Q. Bridge</i> | | | | | | | | | |
| 1 | 203 | 203 | 9,96 | 38 | 213,9 | 291 | 29,9 | 30000 | 1850 |
| 2 | 152,3 | 152,3 | 6,48 | 38 | 305 | 254 | 31,1 | 30000 | 675 |
| 3 | 152,3 | 152,3 | 6,48 | 64 | 305 | 254 | 31,1 | 30000 | 515 |
| <i>K. Cederwall</i> | | | | | | | | | |
| 1 | 120 | 120 | 5 | 20 | 3000 | 304 | 47 | 39000 | 610 |
| 2 | 120 | 120 | 8 | 20 | 3000 | 300 | 46 | 39000 | 760 |
| 3 | 120 | 120 | 8 | 20 | 3000 | 376 | 47 | 39000 | 870 |
| 4 | 120 | 120 | 8 | 20 | 3000 | 379 | 103 | 41000 | 1000 |
| 5 | 120 | 120 | 8 | 20 | 3000 | 379 | 39 | 39000 | 820 |

Полученные данные, представленные в виде графиков, можно условно разделить на две группы. В первой при достижении прогибов, соответствующих фактической несущей способности, дальнейшее поведение трубобетонного элемента не записывалось, и, таким образом, на графиках была представлена только восходящая кривая. Во второй группе с развитием деформаций был зарегистрирован пик, а затем и понижение нагрузки. Такие графики имеют восходящую и ниспадающую части кривой. Оба типа графиков представляют интерес для данного исследования. На рис. 2–11 показано, как обратный численно-аналитический метод предсказывает поведение экспериментального образца.

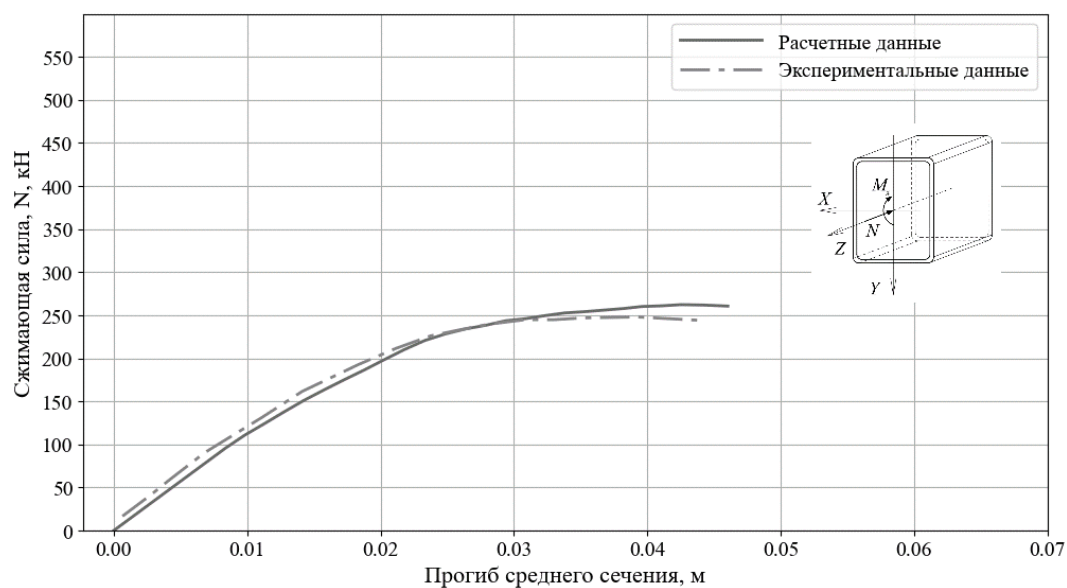


Рис. 2. График зависимости «прогиб-нагрузка» по работе *H. Shakir-Khalil, J. Zegniche*: стержень № 1

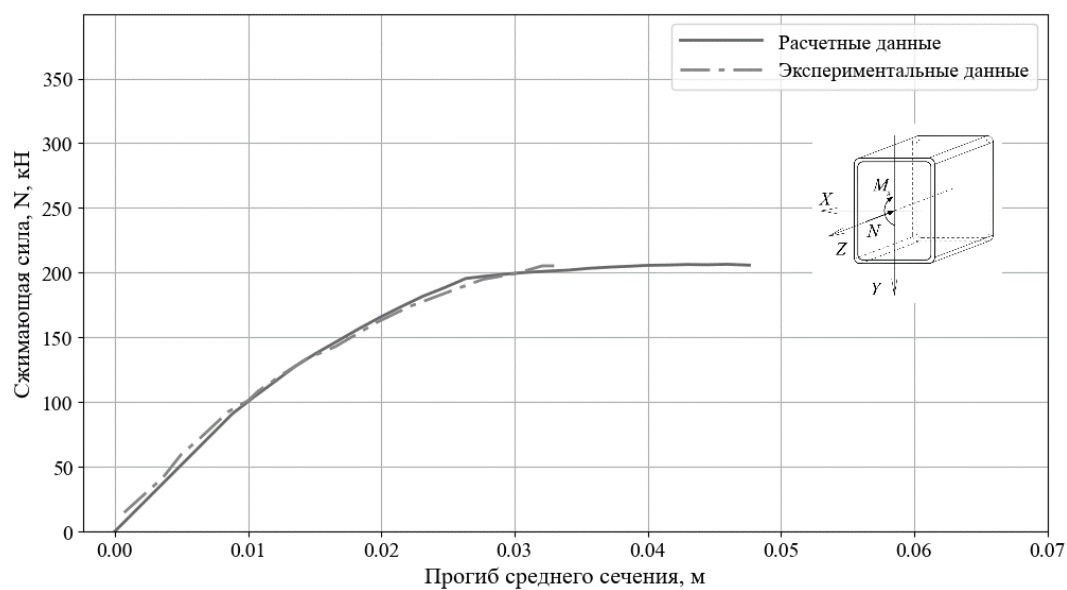
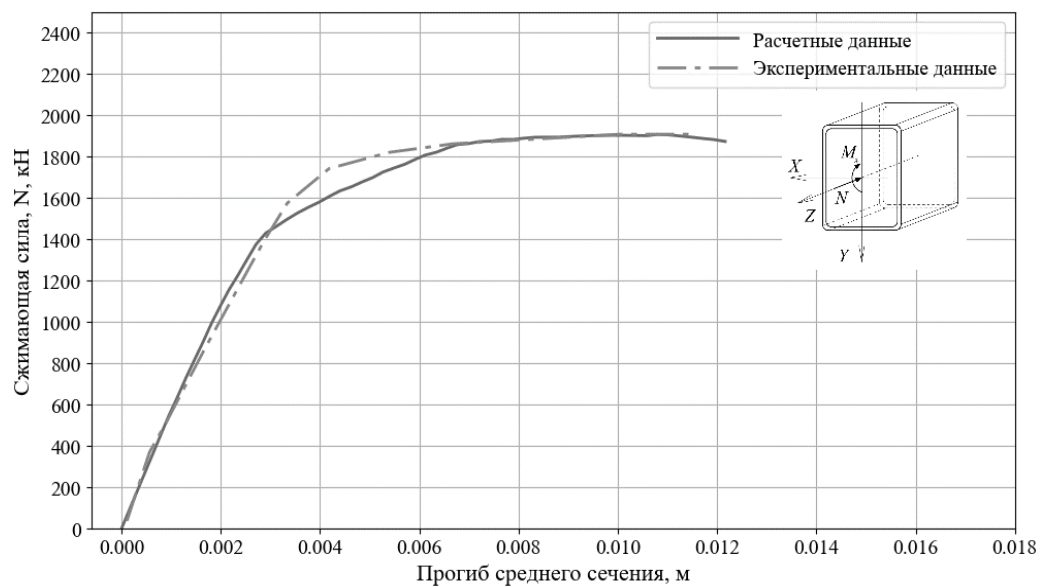
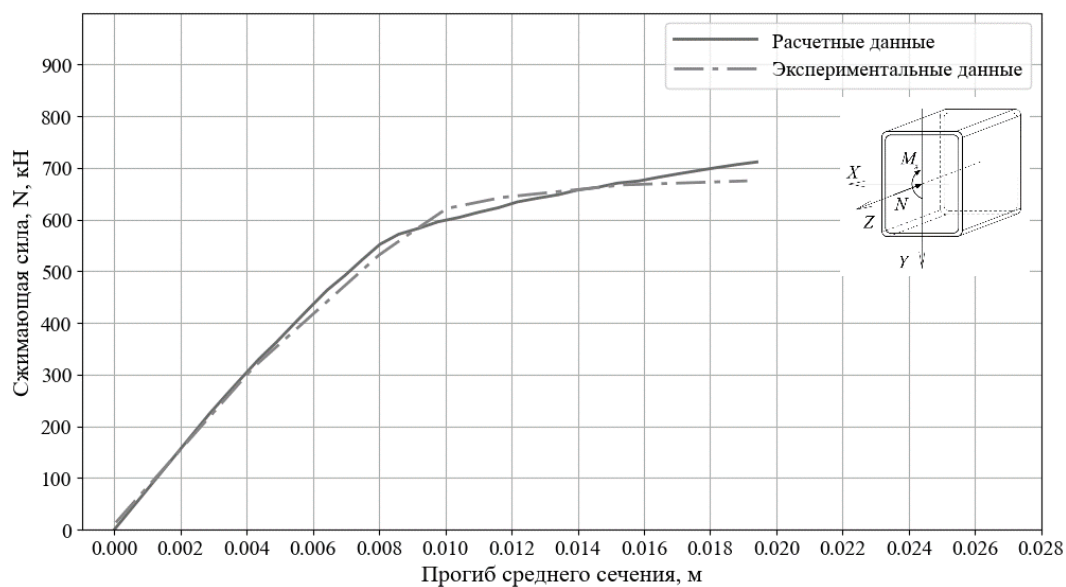


Рис. 3. График зависимости «прогиб-нагрузка» по работе *H. Shakir-Khalil, J. Zegniche*: стержень № 2

Сопоставление графиков «прогиб-нагрузка» по работе [6] для восходящей кривой экспериментальных и расчетных данных показывает хорошую сходимость.

Рис. 4. График зависимости «прогиб-нагрузка» по работе *R.Q. Bridge*: стержень № 1Рис. 5. График зависимости «прогиб-нагрузка» по работе *R.Q. Bridge*: стержень № 2

Сопоставление графиков «прогиб-нагрузка» по работе [8, 9] для восходящей кривой экспериментальных и расчетных данных показывает хорошую сходимость. Лишь на рис. 6 экспериментальные данные показывают меньшую несущую способность по сравнению с расчетными (около 10 %).

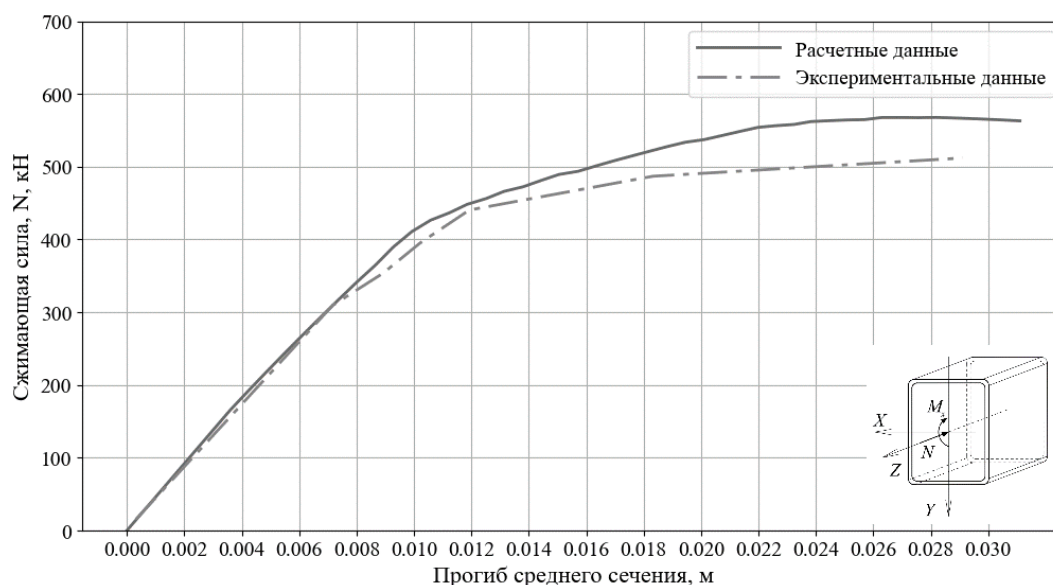


Рис. 6. График зависимости «прогиб-нагрузка» по работе *R.Q. Bridge*: стержень № 3

Сопоставление графиков «прогиб-нагрузка» по работе [10] для восходящей и нисходящей кривых экспериментальных и расчетных данных показывает удовлетворительную сходимость. Результаты расчета показывают сходимость с экспериментальными данными в пределах 0–9 % (удовлетворительную). Нисходящая ветвь показывает, что при одинаковом уровне прогибов обратный метод дает более низкие значения остаточной несущей способности (в запас). Такое расхождение можно объяснить необходимостью уточнения диаграммы работы бетона в трубобетонном элементе. Примером такой диаграммы служит диаграмма деформирования бетона в работе *D. Liu* [11], которая имеет плавную ниспадающую кривую и применяется в том числе для бетона, заключенного в трубы прямоугольного сечения.

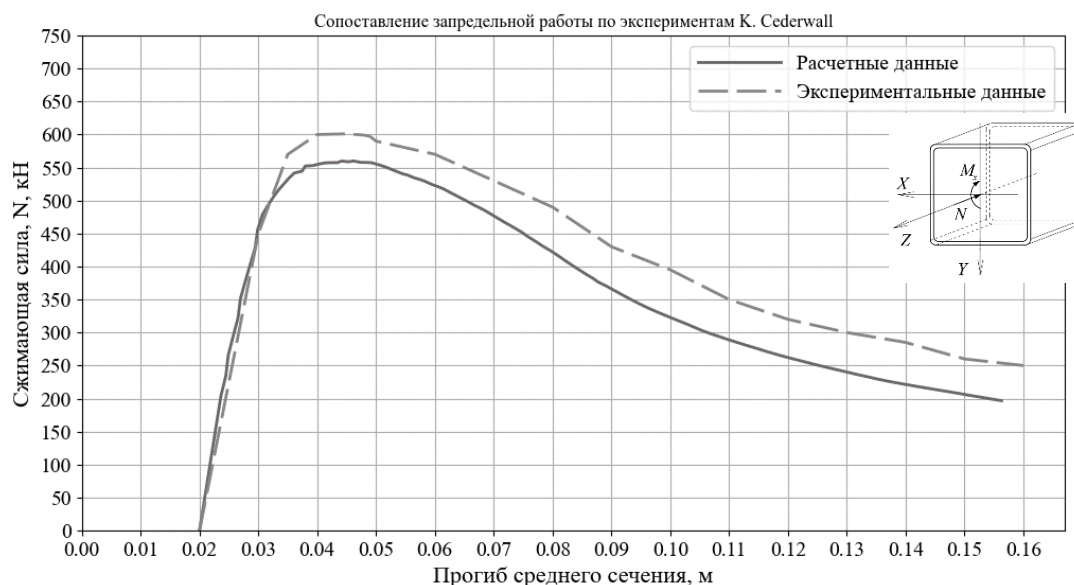


Рис. 7. График зависимости «прогиб-нагрузка» по работе *K. Cederwall*, стержень № 1

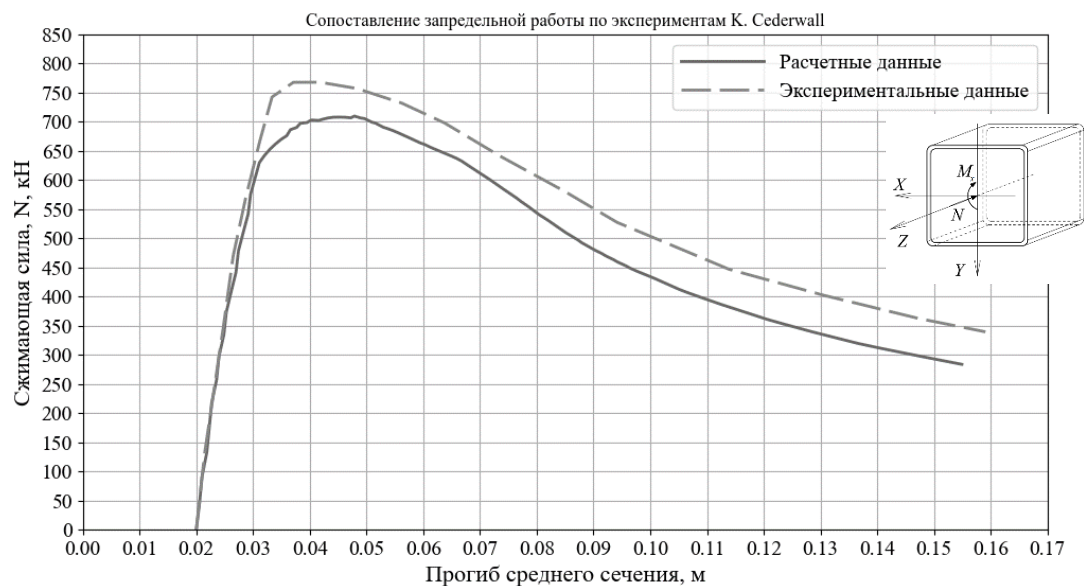


Рис. 8. График зависимости «прогиб-нагрузка» по работе K. Cederwall: стержень № 2

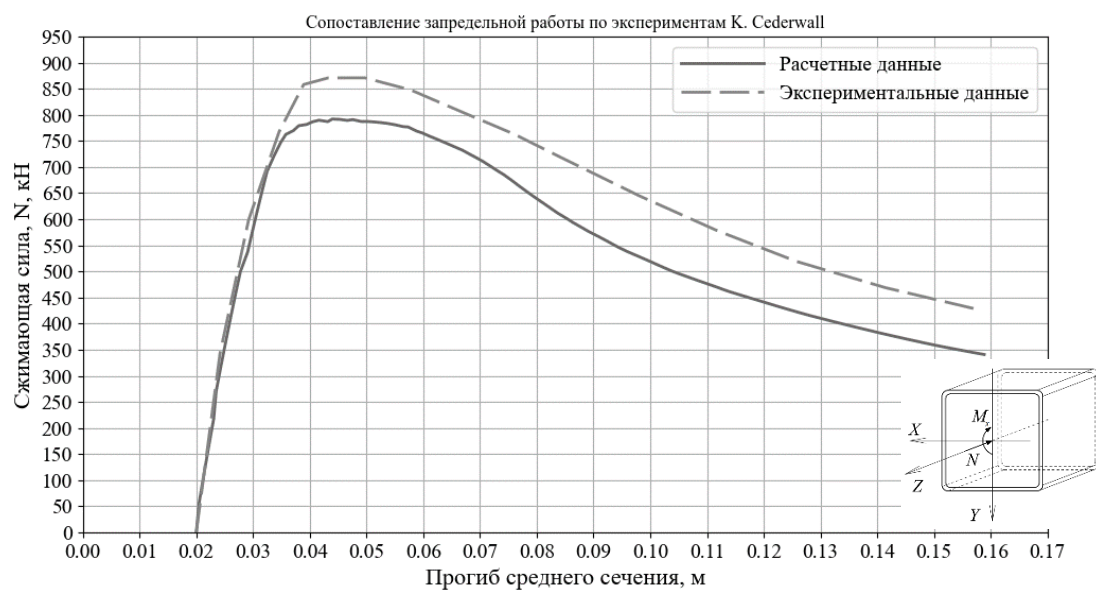


Рис. 9. График зависимости «прогиб-нагрузка» по работе K. Cederwall: стержень № 3

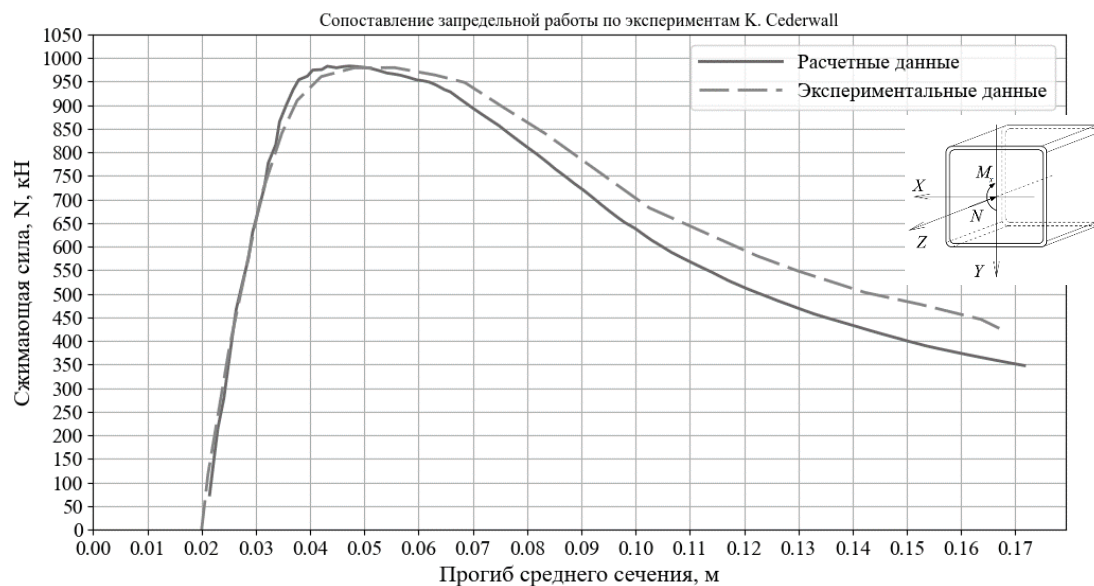


Рис. 10. График зависимости «прогиб-нагрузка» по работе K. Cederwall: стержень № 4

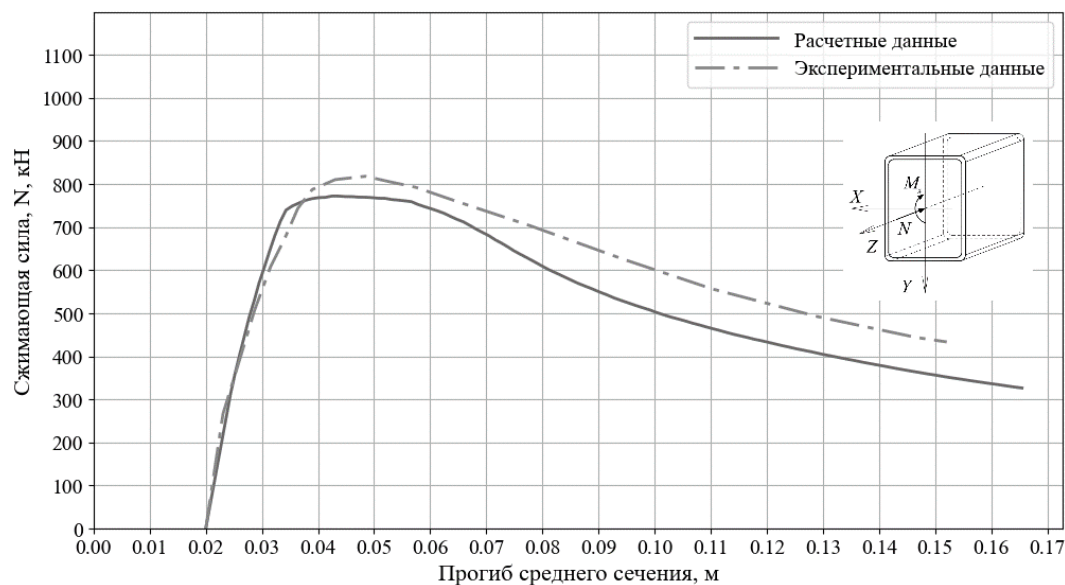


Рис. 11. График зависимости «прогиб-нагрузка» по работе K. Cederwall: стержень № 5

Выводы

1. Обратный численно-аналитический метод позволяет определить зависимость «прогиб-нагрузка» в предельной и запредельной стадиях работы при действии сжимающей силы с одноосным эксцентриситетом с хорошим уровнем сходимости с экспериментальными данными.

2. Необходимо использовать уточненные диаграммы деформирования бетона для более точного расчета ниспадающей кривой графиков зависимости «прогиб-нагрузка» и определения остаточной несущей способности.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афанасьев, А. А. Трубобетонные конструкции для возведения каркасных зданий / А. А. Афанасьев, А. В. Курочкин // *Строительные науки*. – 2016. – № 2. – С. 113–118.
2. Кибирева, Ю. А. Применение конструкций из сталежелезобетона / Ю. А. Кибирева, Н. С. Астафьева. – Текст : электронный // *Экология и строительство*. – 2018. – № 2. – С. 27–33. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-konstruktsiy-iz-stalezhelezobetona> (дата обращения: 03.05.2026).
3. Белый, Г. И. Исследование прочности и устойчивости трубобетонных элементов конструкций обратным численно-аналитическим методом / Г. И. Белый, А. А. Ведерникова // *Вестник гражданских инженеров*. – 2021. – № 2 (85). – С. 26–35.
4. Белый, Г. И. Обратный численно-аналитический метод расчета стержневых элементов ЛСТК / Г. И. Белый, М. О. Смирнов // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2021. – № 3. – С. 57–68.
5. Белый, Г. И. Запредельная несущая способность стержневых элементов стальных конструкций / Г. И. Белый, А. И. Гарипов // *Международный строительный конгресс. Наука. Инновации. Цели. Строительство : сборник тезисов докладов, Москва, 11–13 апреля 2023 года*. – Москва : Строительство, 2023. – С. 195–196. – DOI 10.37538/2949-219X-2023. – EDN LNHFRW.
6. Shakir-Khalil, H. Experimental behavior of concrete-filled rolled rectangular hollow-section columns / H. Shakir-Khalil, J. Zegniche // *The Structural Engineer*. – 1989. – Vol. 67, № 19/3. – P. 346–353.
7. Response of self-compacting concrete filled tubes under eccentric compression / G. Muciaccia, F. Giussani, G. Rosati, F. Mola // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2011. – № 67. – P. 904–916.
8. Gourley, B. C. A synopsis of studies of the monotonic and cyclic behavior of concrete filled steel tube beam-column. Structural Engineering Report No. ST-01-4 / B. C. Gourley, C. Tort, J. F. Hajjar, P. H. Schiller ; Department of Civil Engineering, Institute of Technology University of Minnesota. – USA, 2001. – 269 c.
9. O'Shea, M. D. Design of circular thin-walled concrete filled steel tubes / M. D. O'Shea, R. Q. Bridge // *Journal of Structural Engineering*. – 2000. – Vol. 126, № 11. – P. 1295–1303.
10. Cederwall, K. High-strength concrete used in composite columns / K. Cederwall, B. Engstrom, M. Grauers // *ACI Symposium Publication*. – 1990. – № 121. – P. 195–214.
11. Liu, D. Behaviour of eccentrically loaded high-strength rectangular concrete-filled steel tubular columns / D. Liu // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2006. – № 62 – С. 839–846.

VEDERNIKOVA Alena Andreevna, candidate of technical sciences, acting head of the chair of information and mathematical modeling technologies

ULTIMATE AND UNDER ULTIMATE CONCRETE FILLED STEEL TUBE COLUMNS DEFORMATION BEHAVIOR

St Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering.

4, 2nd Krasnoarmeiskaya St., St Petersburg, 190005, Russia.

Tel.: (904) 605-65-88; e-mail: alena@avedernikova.ru

Key words: concrete filled steel tube columns, CFST, inverse numerical-analytical method, HCFST.



The article presents the results of comparing experimental data of concrete filled steel tube columns made at different times with the results of calculation using the reverse numerical-analytical method. The data is provided for under ultimate and ultimate behavior in the form of graphs of structural deformation under load.

REFERENCES

1. Afanasev A. A., Kurochkin A. V. Trubobetonnye konstruksii dlya vozvedeniya karkasnykh zdaniy [Concrete filled steel tube structures for the construction of frame buildings]. *Stroitelnye nauki*, 2016, № 2, P. 113–118.
2. Kibireva Yu. A., Astafeva N. S. Primenenie konstruksiy iz stalezhelezobetona [The use of composite steel concrete structures]. *Ehkologiya i stroitelstvo*, 2018, № 2, P. 27–33. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenienie-konstruksiy-iz-stalezhelezobetona> (accessed: 03.05.2026).
3. Bely G. I., Vedernikova A. A. Issledovanie prochnosti i ustoychivosti trubobetonnykh ehlementov konstruksiy obratnym chislenno-analiticheskim metodom [Investigation of the strength and stability of concrete filled tube structural elements by the reverse numerical-analytical method]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2021, № 2 (85), P. 26–35.
4. Bely G. I., Smirnov M. O. Obratny chislenno-analiticheskiy metod rascheta sterzhnevnykh elementov LSTK [Reverse numerical and analytical method for calculating LSTK core elements]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Industrial and Civil Construction]. 2021, № 3, P. 57–68.
5. Bely G. I., Garipov A. I. Zapredelnaya nesushchaya sposobnost sterzhnevnykh ehlementov stalnykh konstruksiy [Over-ultimate bearing capacity of core elements of steel structures]. *Mezhdunarodny stroitelny kongress. Nauka. Innovatsii. Tseli. Stroitelstvo: Sbornik tezisov dokladov*, 11–13 aprelya 2023 goda. Moscow, Stroitelstvo, 2023, P. 195–196.
6. Shakir-Khalil H., Zegniche J. Experimental behavior of concrete-filled rolled rectangular hollow-section columns. *The Structural Engineer*. 1989. Vol. 67. № 19/3. P. 346–353.
7. Muciaccia G., Giussani F., Rosati G., Mola F. Response of self-compacting concrete filled tubes under eccentric compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, № 67, P. 904–916.
8. Gourley B. C., Tort C., Hajjar J. F., Schiller P. H. A synopsis of studies of the monotonic and cyclic behavior of concrete filled steel tube beam-column. *Structural Engineering Report No. ST-01-4*. Department of Civil Engineering, Institute of Technology, University of Minnesota, USA, 2001, 269 p.
9. O'Shea M. D., Bridge R. Q. Design of circular thin-walled concrete filled steel tubes. *Journal of Structural Engineering*. 2000, Vol. 126. № 11, P. 1295–1303.
10. Cederwall K., Engstrom B., Grauers M. High-strength concrete used in composite columns. *ACI Symposium Publication*, 1990, № 121, P. 195–214. <https://doi.org/10.14359/2838>.
11. Liu D. Behaviour of eccentrically loaded high-strength rectangular concrete-filled steel tubular columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, № 62, P. 839–846.

© А. А. Ведерникова, 2026

Получено: 04.05.2026 г.



УДК 624.94.014.2

Р. Г. ГАЙНЕТДИНОВ, канд. техн. наук, доц. кафедры металлических конструкций и испытаний сооружений; **И. Р. САЛИМЗЯНОВ**, аспирант кафедры металлических конструкций и испытаний сооружений

РЕШЕТЧАТЫЕ КОНСТРУКЦИИ ИЗ СТАЛЬНЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 420043, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1.

Тел.: (937) 612-90-09; эл. почта: iskander706@mail.ru

Ключевые слова: холодногнутые профили; решетчатые конструкции; сечения; узловые решения; тонкостенные конструкции.

В статье произведен обзор существующих решений решетчатых конструкций, выполняемых из холодногнутых тонкостенных профилей, которые наиболее часто используются в современном строительстве и получили обширные изучения с проведением натурных испытаний. Выделяются два основных типа решетчатых конструкций по типу соединения элементов решетки и поясов: бесфасоночные и фасоночные. Проведен анализ их геометрических характеристик, области применения, узловых соединений раскосов и поясов, сечений основных элементов. Выделены особенности каждого типа решетчатых конструкций. Рассмотрены проведенные испытания решетчатых конструкций, выделены некоторые недостатки и сделаны выводы о возможных модификациях существующих решений. Определены актуальные направления развития решетчатых конструкций, а именно: применение составных профилей закрытого сечения для повышения жесткости элементов, разработка новых узловых решений для снижения металлоемкости, оценка эффективности фрикционных соединений.

Развитие строительной отрасли в настоящее время направлено на применение более технологичных материалов и конструкций, которые позволяют удовлетворять требованиям прочности, надежности, долговечности, при этом с минимальными материальными и временными затратами [1]. В связи с этим широкое распространение получают легкие строительные конструкции, выполненные из холодногнутых тонкостенных оцинкованных профилей [2–3]. Толщина элементов таких конструкций не превышает 4 мм и для обеспечения коррозионной стойкости элементы покрываются цинковым покрытием класса не ниже 275 [4–5]. Профили изготавливаются путем холодной гибки или холодного профилирования через валики, что позволяет получать сечения различной формы и размеров. Наиболее часто применяемые конструкции из тонкостенных оцинкованных профилей – фермы покрытий промышленных зданий, как вновь возводимых, так и подверженных реновации [6]. Фермы могут выполняться различной формы в зависимости от действующих нагрузок и других технических требований: треугольные, трапецеидальные, с параллельными поясами, полигональные, с криволинейными поясами, сегментные [7–8].

Фермы выполняют пролетами до 24 м с различной конфигурацией решетки [9–10]. Как правило, решетка фермы состоит из следующих элементов: верхнего пояса, нижнего пояса, вертикальных и наклонных раскосов. Соединение

элементов между собой производится при помощи болтов обычной прочности, вытяжных заклепок, самонарезающих и самосверлящих винтов [11].

По решению узловых соединений фермы подразделяются на два основных вида: бесфасоночные и фасоночные.

Рассмотрим существующие конструктивные решения ферм, сечения их элементов, узловые решения, имеющиеся недостатки и возможные пути их совершенствования.

В учебном пособии представлены наиболее распространенные конструктивные схемы ферм, выполняемые из холодногнутых профилей, которые отличаются узловыми решениями крепления раскосной решетки и поясов [12].

Один из типов ферм выполняется в бесфасоночном решении узлов (рис. 1), что дает экономию на собственном весе конструкции и упрощает сборку. Верхний и нижний пояс фермы выполняются из парных С-образных профилей, сечения которых подбираются по расчету. Раскосная часть аналогично может выполняться из парных или одиночных С-образных профилей. Узел соединения раскосов реализуется следующим образом: производится подрезка полок раскосов и заведение их между парными профилями поясов. Глубина заведения зависит от выбранного типа крепежа, их количества и конструктивного требования по их размещению.

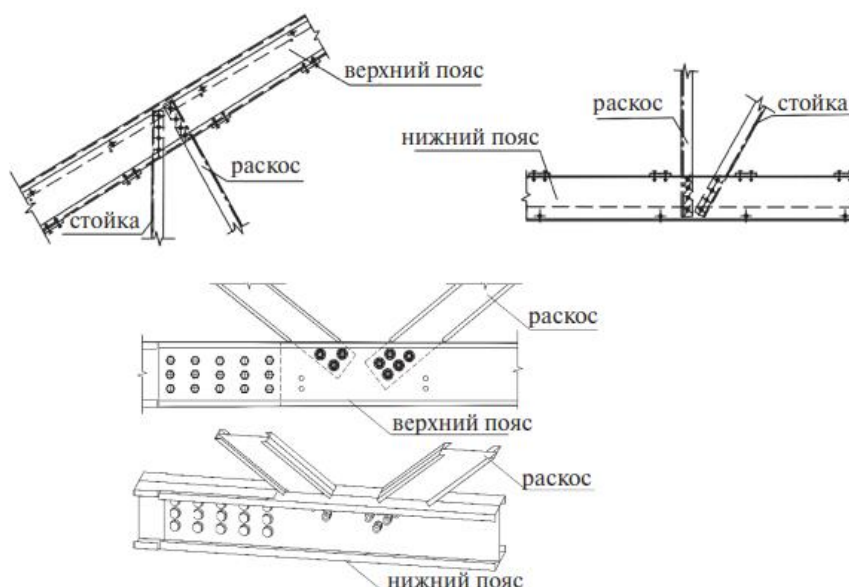


Рис. 1. Бесфасоночная ферма

Применение таких ферм возможно на относительно небольших пролетах (до 15 м) с соединением при помощи самонарезающих винтов или болтов. Несмотря на уменьшение собственного веса фермы за счет исключения дополнительных стальных листовых фасонок, необходимо учитывать в расчете раскосов уменьшение площади поперечного сечения A_{gn} за счет подрезки стенок, что потребует увеличения сечения всего раскоса и неполное использование сечения в местах, где не выполняется подрезка полок.

Ферма, выполняемая в бесфасоночном исполнении с раздвинутыми парными профилями, исключает недостатки предыдущей, связанные с необходимостью подрезки полок раскосов в узловых частях, при этом сохраняет преимущество в

виде отсутствия дополнительных стальных фасонных элементов, которые увеличивают собственный вес фермы [12]. Верхний и нижний пояс фермы состоит из спаренных П или С-образных профилей, которые разносятся друг от друга на величину фасонки. Раскосы заводятся между профилями поясов и соединяются при помощи болтов или самонарезающих винтов. Длина таких ферм ограничивается габаритами транспорта, длина которых не превышает 16 м. При больших усилиях в раскосах фермы возможно введение дополнительных отрезков профилей в местах стыка раскосов и поясов, что позволяет расположить большое количество крепежа. Также возможно введение дополнительных соединительных планок в поясах, которые позволяют обеспечить совместную работу двух профилей в пролетах, свободных от раскосов путем увеличения радиуса инерции.

Результаты испытания ферм [13] пролетом 6 м с усилением и без усиления показывают, что для всех испытанных ферм свойственна следующая последовательность разрушения:

1. Потеря местной устойчивости полок и стенок сжатых профилей;
2. Потеря общей устойчивости сжатых опорных раскосов и поясов.

Для определения устойчивости и несущей способности профилей при восприятии нагрузок применяются различные методы расчета: МКЭ, энергетический метод, метод эффективной ширины, метод прямого определения прочности и т. д. [14].

К недостаткам данных ферм можно отнести ограниченное пространство для установки метизов, что уменьшает величину перекрываемых пролетов и допустимых нагрузок. Также для обеспечения совместной работы парных элементов поясов требуется введение промежуточных элементов, что приводит к увеличению собственного веса фермы.

Ферма, пояса которой выполняются из парных элементов с креплением раскосной части через стальные фасонные элементы, лишена недостатков предыдущих типов ферм и позволяет перекрывать пролеты длиной от 18 м до 24 м. Элементы фермы представляют собой спаренные профили С и П-образного сечения, объединяемые через соединительные прокладки (фасонки) из черного металла.

Ферма выполняется из двух частей (полуферм) для удобства транспортировки к месту установки. Перед монтажом производится укрупнительная сборка и протяжка болтовых соединений. Верхний и нижний пояс каждой полуфермы выполняется по неразрезной схеме из спаренных профилей С-образного сечения. Между профилями поясов устанавливаются листовые стальные фасонки для крепления раскосов, которые выполняются из С или П-образных профилей. Размеры фасонки подбираются конструктивно, по требуемому количеству болтов в соединении. В ферме выделяются три основных узла: опорный узел, промежуточный узел, коньковый узел (рис. 2).

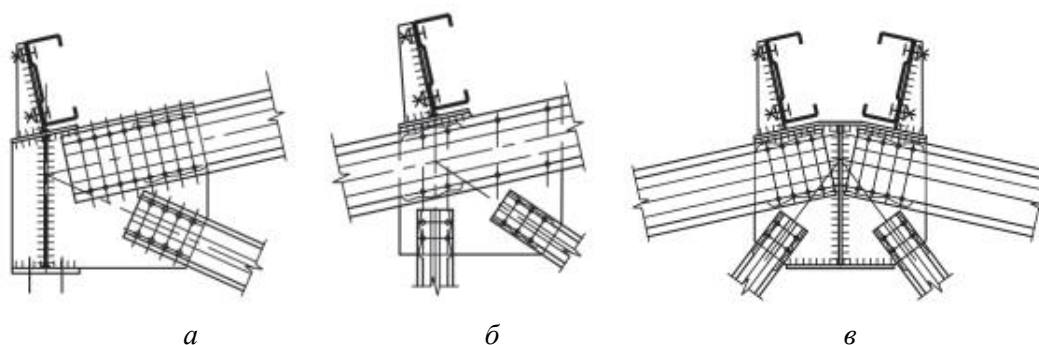


Рис. 2. Основные узлы фермы с применением стальной фасонки: *а* – опорный узел; *б* – промежуточный узел; *в* – коньковый узел

Испытания показывают, что фактическая несущая способность фермы соответствует теоретическим расчетам. Однако при первичном нагружении фермы появляется проскальзывание элементов болтового соединения, что приводит к резкому увеличению деформативности фермы, которая превышает теоретическое значение на 30 % [15]. Максимальные деформации наблюдались в верхнем сжатом поясе, который теряет устойчивость из плоскости действия усилия при недостаточном раскреплении. Также появляются деформации в верхнем поясе между раскосами, что обусловлено недостаточной жесткостью открытого спаренного сечения из тонкостенных элементов. Экспериментальные исследования сжатых С-образных элементов в программных комплексах демонстрируют идентичную форму потери местной устойчивости сжатых элементов, которая начинается с потери устойчивости и волнообразным искривлением полок профиля переходящая в потерю устойчивости в стенке, которая уже является критической [16–17]. Окончательное разрушение фермы произошло после потери устойчивости стенки профиля в опорной зоне.

Недостатками данной фермы являются недостаточная жесткость существующих сечений сжатых поясов и применение массивных стальных фасонных элементов, которые значительно увеличивают собственный вес конструкции [18].

Аналогичный вариант фермы пролетом 24 м с высотой в середине пролета 2,2 м имеет отличительные особенности: уменьшение расчетной длины сжатого пояса за счет введения дополнительных элементов раскосной части – стоек [19]. Применение Сигма-образных профилей, обладающих высокой местной устойчивостью стенки, положительно сказывается на общей устойчивости пояса по сравнению с поясом из С-образных профилей [20]. Элементы фермы выполняются из стали класса С350 [21]. Данные особенности позволяют увеличить несущую способность фермы.

Результаты испытания показали схожий результат с предыдущими исследованиями ферм, на первых стадиях нагружения просматривается повышенная деформативность фермы, связанная с податливостью болтовых соединений. С увеличением нагрузки при условии соблюдения требуемого раскрепления фермы из плоскости, происходит потеря местной устойчивости сжатых профилей.

Однако данный вид ферм также имеет недостаточную жесткость сжатого пояса, что обусловлено применением профилей открытого сечения, которым

свойственна местная потеря устойчивости и выключение из работы консольных полок [22]. В данном виде ферм по-прежнему остается необходимость применения массивных стальных фасонных элементов для крепления раскосной решетки, что приводит к увеличению металлоемкости.

Современные исследования в области решетчатых конструкций из тонкостенных стальных элементов направлены на оптимизацию существующих решений и разработку новых. Ферма, пояса и раскосы которой выполнены из парных раздвинутых элементов, позволяет увеличить жесткость элементов путем введения дополнительных тонкостенных скоб, которые обеспечивают совместную работу профилей и исключают локальную потерю устойчивости в полках [23]. Соединение раскосных элементов с поясами выполняется путем установки тонколистовых стальных фасонных элементов и метизов. Для массового применения данных ферм требуется численная и экспериментальная проработка зависимости шага и сечения устанавливаемых стальных скоб.

Актуальное исследование фасонных ферм с применением поясов из элементов с трапециевидной стенкой показывает необходимость использования узловых решений с равномерным распределением болтов по сечению, что позволит достичь равномерного распределения напряжений по тонкостенному профилю и уменьшение размера стального фасонного элемента [24–25]. Также возможно применение высокопрочных болтовых соединений в аналогичных решетчатых конструкциях с фасонными элементами. Существующие исследования показывают значительное увеличение несущей способности узловых соединений из холодногнутых профилей с применением высокопрочных болтов [26]. Однако требуются дополнительные исследования по поведению фрикционных соединений в составе решетчатых конструкций.

Широкое применение ферм из холодногнутых профилей ведется за рубежом, где так же стремятся достичь минимального собственного веса за счет применения специальных узловых соединений и сечений элементов.

Ферма с поясами и раскосами из *U*-образных профилей с соединением элементов при помощи стальных болтов и нейлоновых толстостенных втулок, для исключения деформаций профиля при затягивании болтов [27]. Для заведения раскосов в полость поясов выполняется подрезка консольных элементов жесткости полок, что приводит к потере местной устойчивости раскосов в данной зоне.

Решением проблемы устойчивости сжатых поясов фермы начали заниматься за рубежом [28]. Фермы выполняются небольшого пролета до 10 м и необходимы для применения в качестве элементов перекрытий и покрытий зданий. Сжатый пояс фермы выполняется из спаренных профилей *U*-образного и *C*-образного сечения, которые образуют составное закрытое сечение (рис. 3), раскосы и нижний пояс фермы – из одиночных профилей *C*-образного сечения.

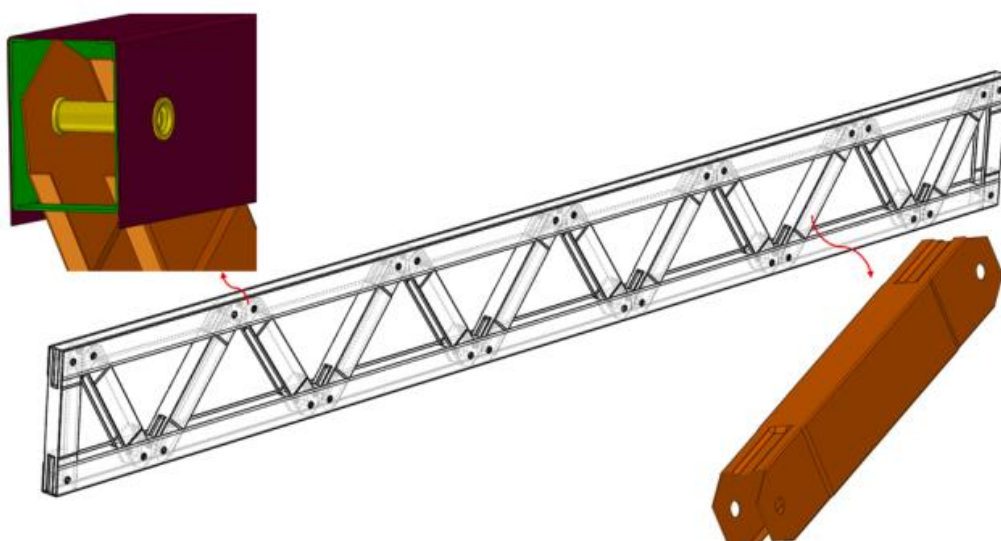


Рис. 3. Ферма с закрытым составным сечением верхнего пояса

Результаты испытания сжатых профилей закрытого составного сечения показывают значительное увеличение жесткости, а теоретическое исследование по применению таких профилей в качестве верхнего пояса фермы показывает значительное повышение несущей способности [29].

Результат проведенного анализа существующих решений и натурных испытаний решетчатых конструкций из холодногнутых профилей показывает существование следующих недостатков:

1. Недостаточная общая и местная устойчивость сжатых профилей, требующая усовершенствование их поперечного сечения;
2. Увеличение металлоемкости за счет включения дополнительных массивных стальных элементов (фасонки) для крепления элементов решетки между собой;
3. Повышенная деформативность ферм с применением болтовых соединений обычной прочности на первых этапах загрузки за счет податливости.

Для более эффективного использования решетчатых конструкций из холодногнутых профилей необходима разработка новых решений, позволяющих нивелировать существующие недостатки [30]. Одним из способов решения существующих проблем является применение профилей закрытого сечения, которые обладают повышенной жесткостью. Необходима разработка, исследование и испытание новых узловых решений, которые бы позволили отказаться от применения дополнительных стальных фасонных элементов. Также требуются исследования по оценке эффективности применения фрикционных соединений в составе решетчатых конструкций.

Вклад авторов: все сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гайнетдинов, Р. Г. Стальные полигональные арочные конструкции из унифицированных элементов / Р. Г. Гайнетдинов, Л. Р. Гимранов, М. Т. Сибгатуллин //



- Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2023. – № 4 (66). – С. 25–32. – DOI 10.52409/20731523_2023_4_25. – EDN ATUWIT.
2. Recent research on built-up cold-formed steel structures / Kim J. R. Rasmussen, Mani Khezri, Hao Zhang [et al.] // *Thin-Walled Structures*. – October 2025. – Vol. 215, Part B.
3. Гайнетдинов, Р. Г. Конструкции из тонколистовых стальных материалов / Р. Г. Гайнетдинов, Л. Р. Гимранов. – Казань : Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2024. – 224 с. – ISBN 978-5-7829-0612-2. – EDN AOOSZS.
4. Якупов, С. Н. Коррозия тонкостенного элемента конструкций в водной среде при вибрации / С. Н. Якупов, И. Т. Мирсаяпов // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2025. – № 3 (73). – С. 270–278. – DOI 10.48612/NewsKSUAE/73.22. – EDN UESDVU.
5. СП 260.1325800.2023. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования : свод правил : издание официальное : утвержден приказом Минстроя России от 28.12.2023 N 1015/пр) : дата введения 29 января 2024 г. – Москва, 2023. – 124 с.
6. Рачкова, О. Г. Реновация промышленных зданий и сооружений / О. Г. Рачкова, С. С. Сердаров // *Архитектура. Реставрация. Дизайн. Урбанистика*. – 2025. – № 2 (6). – С. 270–282.
7. Способ изготовления полигональной металлической фермы / Г. Н. Шмелев, П. В. Еремеев, А. А. Галиев [и др.] // *Строительные конструкции, здания и сооружения*. – 2025. – № 1 (10). – С. 16–21.
8. Шмелев, Г. Н. Способ изготовления металлических ферм с криволинейным нижним и прямолинейным верхним поясами / Г. Н. Шмелев, П. В. Еремеев, З. З. Файзуллина // *Строительные конструкции, здания и сооружения*. – 2024. – № 4 (9). – С. 40–45.
9. Семенов, А. С. Ферма из холодногнутых профилей повышенной жесткости с болтовыми соединениями : специальность 05.23.01 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Семенов Александр Сергеевич ; Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. – Липецк, 2009. – 183 с.
10. Буторов, И. П. Конструктивные схемы поперечных рам каркасов из легких стальных тонкостенных конструкций / И. П. Буторов, А. В. Михальчишин. // *Colloquium-journal*. – Польша, 2019. – № 13-3 (37). – С. 18–23.
11. Катранов, И. Г. Несущая способность винтовых и заклепочных соединений стальных тонкостенных конструкций : специальность 05.23.01 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Катранов Иван Георгиевич ; Московский государственный строительный университет. – Москва, 2011. – 202 с.
12. Легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК). Проектирование, изготовление, монтаж : учебное пособие для ВУЗов / Астахов И. В., Гудков А. Н., Жидков К. Е. [и др.] ; под общей редакцией Зверева В. В. – Москва : Перо, 2023–412 с. : ил.
13. Опытные исследования стальных ферм из тонкостенных холодногнутых профилей на самонарезающих винтах / А. И. Колесов, А. А. Лапшин, И. А. Ямбаев [и др.] // *Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет*. – Нижний Новгород, 2013. – № 4 (28). – С. 15–19.
14. Каюмов, Р. А. Об одном варианте энергетического метода решения задачи устойчивости балок / Р. А. Каюмов, Л. Р. Хайруллин, Р. Ф. Гилязитдинов // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2024. – № 2 (68). – С. 105–113. – DOI 10.48612/NewsKSUAE/68.9. – EDN IASXFJ.
15. Зверев, В. В. Влияние податливости болтовых соединений на деформативность фермы из тонкостенных гнутых профилей / В. В. Зверев, А. С. Семенов // *Научный*



вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2008. – № 2 (10). – С. 9–17.

16. Кикоть, А. А. Анализ форм потери устойчивости стального стержня из тонкостенного холодногнутого профиля / А. А. Кикоть, К. А. Красулина // Ползуновский альманах. – 2022. – № 1. – С. 81–83.

17. Красулина, К. А. Расчет ферм из стальных тонкостенных холодногнуемых профилей / К. А. Красулина // Наука и молодежь : материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Барнаул, 15–19 апреля 2024 года. – Барнаул : Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, 2024. – С. 71–74. – EDN YNXSOS.

18. Huy Hoang Vu. Local buckling coefficients for thin-walled lipped channels under bending about asymmetrical axis / Huy Hoang Vu, Quoc Anh Vu, Cao Hung Pham // Results in Engineering. – 2025. – Vol. 26.

19. Кузнецов, И. Л. Стенд и результаты испытания фермы пролетом 24 м со стержнями из оцинкованных холодногнуемых профилей / И. Л. Кузнецов, М. А. Салахутдинов, Р. Г. Гайнетдинов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2018. – № 4 (46). – С. 193–199. – EDN YTDWRV.

20. Кикоть, А. А. Эффективность спаренных С и Сигма-образных стальных холодногнуемых профилей в центрально сжатых стержневых элементах / А. А. Кикоть, К. А. Красулина // Ползуновский альманах. – 2021. – № 1. – С. 62–64. – EDN NBYUUS.

21. Исабаева, К. Б. Кыргыз Республикасынын уюмдарындагы жамааттык маданияттын калыптанышы / К. Б. Исабаева, З. К. Самайбекова, И. Х. Курбанова // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. – 2022. – № 2-3 (76). – Р. 1144–1148. – DOI 10.35803/1694-5298.2022.2.1144-1148. – EDN YUABKQ.

22. Annision, R. A mechanics-based design approach to local buckling of thin-walled cross-sections / R. Annision, J. Becque // International Journal of Solids and Structures. – 2025. – Vol. 319.

23. Черных-Рашевский, И. А. Оценка несущей способности 12-метровой фермы из легких стальных тонкостенных профилей / И. А. Черных-Рашевский // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. – 2022. – № 2-1 (76). – С. 476–483. – DOI 10.35803/1694-5298.2022.2.476-483. – EDN WIURRT.

24. Кузнецов, И. Л. Новое узловое соединение холодногнуемых профилей с трапециевидной стенкой / И. Л. Кузнецов, Р. Г. Гайнетдинов // Приволжский научный журнал. Строительные конструкции, здания и сооружения / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2021. – № 1. С. 24–33.

25. Гайнетдинов, Р. Г. Действительная работа болтовых соединений тонкостенных оцинкованных профилей с трапециевидной частью стенки в элементах ферм : специальность 2.1.1 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гайнетдинов Ришат Габдулхаевич ; Казанский государственный архитектурно-строительный университет. – Казань, 2023. – 20 с.

26. Тарасов, А. В. Экспериментально-теоретические исследования рамных конструкций из стальных тонкостенных холодногнуемых профилей : специальность 05.23.01 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тарасов Алексей Владимирович ; Томский государственный архитектурно-строительный университет. – Томск, 2013. – 200 с.

27. Experimental study of LSF truss floor-ceiling systems made of top hat sections / Gihan Ranasinghe, Son Tung Vy, Mahen Mahendran, Anthony Ariyanayagam // Thin-Walled Structures. – July 2025. – Vol. 212.



28. Structural behavior of cold-formed steel trusses incorporating built-up section chords / Wei Wang, Krishanu Roy, Hooman Rezaeian, James B. P. Lim // Thin-Walled Structures. – January 2026. – Vol. 218, Part B.

29. Compressive behavior of a novel cold-formed steel built-up box section: Tests, modelling and design / Wei Wang, Krishanu Roy, Hooman Rezaeian [et al] // Thin-Walled Structures. – May 2025. – Vol. 210.

30. Robert S. Glauz. Enhancements to the Direct Strength Method of cold-formed steel member design / Robert S. Glauz // Thin-Walled Structures. – February 2023. – Vol. 183.

GAYNETDINOV Rishat Gabdulkhayevich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of metal structures and testing of structures; SALIMZYANOV Iskander Radikovich, postgraduate student of the chair of metal structures and testing of structures

LATTICE STRUCTURES MADE OF COLD-FORMED STEEL SECTIONS

Kazan State University of Architecture and Engineering.

1, Green St., Kazan, 420043, Republic of Tatarstan, Russia.

Tel.: (937) 612-90-09; e-mail: iskander706@mail.ru

Key words: cold-formed sections; lattice structures; sections; nodal solutions; thin-walled structures.

This article provides an overview of existing lattice structure solutions made from cold-formed thin-walled sections, which are most commonly used in modern construction and have been extensively studied, including full-scale testing. Two main types of lattice structures are distinguished based on the connection method between lattice elements and chords: non-customized and cusp-type. An analysis of their geometric characteristics, areas of application, nodal connections between diagonals and chords, and cross-sections of the main elements is provided. The specific features of each type of lattice structure are highlighted. Tests of lattice structures are reviewed, some shortcomings are highlighted, and conclusions are drawn regarding possible modifications to existing solutions. Current development trends in lattice structures are identified, namely, the use of closed-section composite sections to increase element rigidity, the development of new nodal solutions to reduce metal consumption, and an assessment of the effectiveness of friction joints.

REFERENCES

1. Gaynetdinov R. G., Gimranov L. R., Sibgatullin M. T. Stalnyye poligonalnyye arochnyye konstruksii iz unifitsirovannykh elementov [Steel polygonal arched structures from standardized elements]. Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [News of the Kazan State University of Architecture and Engineering]. 2023, № 4 (66), P. 25–32. DOI 10.52409/20731523_2023_4_25. EDN ATUWIT.

2. Kim J. R. Rasmussen, Mani Khezri, Hao Zhang, Benjamin W, Schafer. Recent research on built-up cold-formed steel structures. Thin-Walled Structures. October 2025, Vol. 215, Part B.

3. Gaynetdinov R. G. Konstruksii iz tonkolistovykh stalnykh materialov [Structures from thin-sheet steel materials]: monografiya. Kazanskiy gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Kazan, KGASU, 2024, 224 p. SBN 978-5-7829-0612-2. – EDN AOOSZS.

4. Yakupov S. N., Mirsayapov I. T. Korroziya tonkostennogo elementa konstruksiy v vodnoy srede pri vibratsii [Corrosion of a thin-walled structural element in an aquatic environment under vibration] Izvestiya KGASU [News of the Kazan State University of Architecture and Engineering]. 2025, № 3 (73), P. 270–278. DOI: 10.48612/NewsKSUAЕ/73.22, EDN: UESDVU.



5. SP 260.1325800.2023. Konstruktsii stalnyye tonkostennyye iz kholodnogutykh otsinkovannykh profiley i gofirovannykh listov. Pravila proyektirovaniya [Thin-walled steel structures made of cold-formed galvanized sections and corrugated sheets]. Svod pravil: izdaniye ofitsialnoye: data vved. 29.01.24. Minstroy Rossii. Moscow, 2023, 124 p.
6. Rachkova O. G., Serdarov S. S. Renovatsiya promyshlennykh zdaniy i sooruzheniy [Renovation of industrial buildings and structures] Arkhitektura. Restavratsiya. Dizayn. Uristikaban [Architecture. Restoration. Design. Urban science], 2025, 2 (6), P. 270–282.
7. Shmelev G. N., Yeremeyev P. V., Galiyev A. A., Ivanova A. A., Fayzullina Z. Z., Agafonov. B. V. Sposob izgotovleniya poligonalnoy metallicheskoj fermy [Method of manufacturing a polygonal metal truss] Stroitelnyye konstruktsii, zdaniya i sooruzheniya [Building structures, buildings and structures], 2025, № 1 (10), P. 16–21.
8. Shmelev G. N., Yeremeyev P. V., Fayzullina Z. Z. Sposob izgotovleniya metallicheskih ferm s krivolineynym nizhnim i pryamolineynym verkhnim poyasami [Method for manufacturing metal trusses with a curvilinear lower and rectilinear upper chords]. Stroitelnyye konstruktsii, zdaniya i sooruzheniya [Building structures, buildings and structures], 2024, № 4 (9), P. 40–45.
9. Semenov A. S. Ferma iz kholodnogutykh profiley povyshennoy zhestkosti s boltovymi soyedineniyami [Truss from cold-formed sections of increased rigidity with bolted connections]: spetsialnost 05.23.01 : diss. ... kand. tekhn. nauk; Voronezh. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Lipetsk, 2009, 183 p.
10. Butorov I. P., Mikhalechishin A. V. Konstruktivnyye skhemy poperechnykh ram karkasov iz legkikh stal'nykh tonkostennykh konstruktsiy [Structural schemes of transverse frames of frameworks made of light steel thin-walled structures]. Colloquium-journal. Poland, 2019, № 13-3 (37), P. 18–23.
11. Katranov I. G. Nesushchaya sposobnost vintovykh i zaklepochnykh soyedineniy stalnykh tonkostennykh konstruktsiy [Bearing capacity of screw and riveted joints of thin-walled steel structures] : spetsialnost 05.23.01 : diss. ... kand. tekhn. nauk ; Moskov. gos. stroit. un-t. Moscow, 2011, 202 p.
12. Astakhov I. V., Gudkov A. N., Zhidkov K. E. [et al.] Legkiye stalnyye tonkostennyye konstruktsii (LSTK). Proyektirovaniye, izgotovleniye, montazh [Lightweight thin-walled steel structures (LSTC). Design, manufacturing, installation]. Uchebnoye posobiye dlya vuzov. Moscow, Pero, 2023, 412 p., ill.
13. Kolesov A. I., Lapshin A. A., Yambaev I. A., Morozov D. A. Opytnyye issledovaniya stalnykh ferm iz tonkostennykh kholodnogutykh profiley na samonarezayushchikh vintakh [Experimental studies of steel trusses made of thin-walled cold-formed sections on self-tapping screws]. Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal], 2013, 4 (28), P. 15–19.
14. Kayumov R. A., Khayrullin L. R., Gilyazitdinov R. F. Ob odnom variante energeticheskogo metoda resheniya zadachi ustoychivosti balok [On one version of the energy method for solving the problem of beam stability]. Izvestiya KGASU [News of the Kazan State University of Architecture and Engineering]. 2024, № 2 (68), P. 105–113. DOI: 10.48612/NewsKSUA/68.9, EDN: IASXFJ.
15. Zverev V. V., Semenov A. S. Vliyaniye podatlivosti boltovykh soyedineniy na deformativnost fermy iz tonkostennykh gnutnykh profiley [Influence of bolted joint flexibility on the deformability of a truss made of thin-walled bent sections]. Nauchnyy vestnik Voronezh. gos. arkhitektur.-stroit. un-ta. Stroitelstvo i arkhitektura [Russian Journal of Building Construction and Architecture]. 2008, № 2 (10), P. 9–17.
16. Kikot A. A., Krasulina K. A. Analiz form poteri ustoychivosti stalnogo sterzhnya iz tonkostennogo kholodnogutogo profilya [Analysis of the buckling modes of a steel rod made of thin-walled cold-formed profile]. Polzunovskiy almanakh, 2022, № 1, P. 81–83.
17. Krasulina, K. A. Raschet ferm iz stalnykh tonkostennykh kholodnogutykh profiley [Calculation of trusses from steel thin-walled cold-formed sections]. Nauka i molodezh [Science and youth]: Materialy XXI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. April 15–19, 2024, Barnaul, Altay. gos. tekhnich. un-t im. I. I. Polzunov, 2024, P. 71–74. EDN YNXSOS.

18. Huy Hoang Vu, Quoc Anh Vu, Cao Hung Pham. Local buckling coefficients for thin-walled lipped channels under bending about asymmetrical axis. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 26.
19. Kuznetsov I. L., Salakhutdinov M. A., Gainetdinov R. G. Stend i rezultaty ispytaniya fermy proletom 24 m so sterzhnyami iz otsinkovannykh kholodnognutykh profiley [Rig and test results of a 24-meter span truss with rods made of galvanized cold-formed sections]. *Izvestiya Kazan. gos. arkhitektur.-stroit. un-ta* [News of the Kazan State University of Architecture and Engineering]. 2018, № 4 (46), P. 193–199. EDN YTDWRV.
20. Kikotv A. A., Krasulina K. A. Effektivnost sparennykh S i Sigma-obraznykh stalnykh kholodnognutykh profileyv tsentralno szhatykh sterzhnevnykh elementakh [Efficiency of paired c- and sigma-shaped cold-formed steel sections in centrally compressed rod elements]. *Polzunovskiy almanakh*, 2021, № 1, P. 62–64. EDN NBYUUS.
21. Isabaeva K. B., Samaybekova Z. K., Kurbanova I. Kh. Kyrgyz Republicsynyn yumdaryndagy jamaattyk madaniyattyn kalyptanyshi [The formation of public culture in the villages of the Kyrgyz Republic]. *Vestnik Kyrgyz. gos. un-ta stroit., transp.i arkhitektur. im. N. Isanova*. 2022, № 2-3 (76), P. 1144–1148. DOI 10.35803/1694–5298.2022.2.1144–1148. EDN YUABKQ.
22. Annision R., Becque J. A mechanics-based design approach to local buckling of thin-walled cross-sections. *International Journal of Solids and Structures*. 2025, Vol. 319.
23. Chernykh-Rashevsky I. A. Otsenka nesushchey sposobnosti 12-metrovoy fermy iz legkikh stalnykh tonkostennykh profiley [Assessment of the bearing capacity of a 12-meter truss made of light steel thin-walled sections]. *Vestnik Kyrgyz. gos. un-ta stroit., transp. i arkhitektur. im. N. Isanova*. 2022, № 2-1 (76), P. 476–483. DOI 10.35803/ 1694-5298.2022.2.476-483. EDN WIURRT.
24. Kuznetsov I. L., Gainetdinov R. G. Novoye uzlovoye soyedineniye kholodnognutykh profiley s trapetsiyevidnoy stenкой [New nodal connection of cold-formed sections with a trapezoidal wall]. *Privolzhskiy nauchny zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhny Novgorod, 2021. № 1, P. 24–33.
25. Gaynetdinov R. G. Deystvitelnaya rabota boltovykh soyedineniy tonkostennykh otsinkovannykh profiley s trapetsiyevidnoy chast'yu stenki v elementakh ferm [Actual performance of bolted connections of thin-walled galvanized sections with a trapezoidal part of the web in truss elements]: spetsialnost 2.1.1 : avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk: Kazan. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Kazan, 2023, 20 p.
26. Tarasov A. V. Eksperimentalno-teoreticheskiye issledovaniya ramnykh konstruktsiy iz stal'nykh tonkostennykh kholodnognutykh profiley [Experimental and theoretical studies of frame structures made of cold-formed steel thin-walled sections] : spetsialnost 05.23.01 : diss. ... kand. tekhn. nauk ; Tomsk. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Tomsk, 2013, 200 p.
27. Gihan Ranasinghe, Son Tung Vy, Mahen Mahendran, Anthony Ariyanayagam Experimental study of LSF truss floor-ceiling systems made of top hat sections. *Thin-Walled Structures*. July 2025, Vol. 212.
28. Wei Wang, Krishanu Roy, Hooman Rezaeian, James B. P. Lim. Structural behavior of cold-formed steel trusses incorporating built-up section chords. *Thin-Walled Structures*. January 2026, Vol. 218, Part B.
29. Wei Wang, Krishanu Roy, Hooman Rezaeian, Kang Huang, Shubham Tiwari, James B. P. Lim. Compressive behavior of a novel cold-formed steel built-up box section: Tests, modelling and design. *Thin-Walled Structures*. May 2025, Vol. 210.
30. Robert S. Glauz Enhancements to the Direct Strength Method of cold-formed steel member design. *Thin-Walled Structures*. February 2023, Vol. 183.

© Р. Г. Гайнетдинов, И. Р. Салимзянов, 2026

Получено: 28.01.2026 г.



УДК 624.97:624.042.4

Ю. Д. МАРКИНА, канд. техн. наук, доц. кафедры теории сооружений и технической механики

ВЛИЯНИЕ ДЕТАЛИЗАЦИИ СХЕМЫ ПЕРЕДАЧИ НАГРУЗОК ОТ ОБОРУДОВАНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТЧАТОЙ БАШНИ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-54-96; эл. почта: tstm@nngasu.ru, poluektoff@bk.ru

Ключевые слова: антенно-мачтовые сооружения, башня сотовой связи, технологическое оборудование, расчет несущей способности, ветровая нагрузка, укрупненное приложение нагрузки, коэффициент использования, собственные колебания.

В инженерной практике расчета антенно-мачтовых сооружений нагрузки от антенно-фидерных устройств нередко задаются укрупненно, без точного учета узлов фактического крепления, однако влияние такого упрощения на результаты расчета изучено недостаточно. Цель работы – оценка влияния степени детализации схемы передачи нагрузок от технологического оборудования на напряженно-деформированное состояние металлической башни сотовой связи. Исследование выполнено методом конечных элементов в ПК SCAD Office. Сопоставлены результаты двух вариантов моделирования: с точным приложением нагрузок от оборудования в фактические узлы крепления и с их укрупненным распределением по узлам поясов ближайшего яруса. Проанализированы коэффициенты использования несущей способности элементов, горизонтальные перемещения, периоды и формы собственных колебаний. Установлено, что укрупненное приложение нагрузок допустимо при общей оценке работы сооружения, однако при анализе локальной работы элементов решетки, к которым крепится оборудование, и уточнении динамических характеристик сооружения, предпочтительно точное задание нагрузок.

Введение

Антенно-мачтовые сооружения относятся к пространственным стержневым системам, чувствительным к действию ветровых и эксплуатационных нагрузок [1, 2]. Существенное влияние на их работу оказывает технологическое оборудование, размещаемое на различных отметках ствола. Вопросам расчета антенно-мачтовых сооружений посвящен значительный объем исследований, в которых рассматриваются особенности работы решетчатых башен под действием ветровых нагрузок [3–7], влияние геометрии сооружения [8–11], высотного расположения оборудования [12–14] и способы численного моделирования пространственных стержневых систем [15–17]. Отдельное внимание уделяется определению нагрузок от антенного оборудования и оценке их влияния на напряженно-деформированное состояние опор связи [18–20].

Антенно-мачтовые сооружения в процессе эксплуатации регулярно переоснащаются, а проверка их несущей способности требует учета не только массы, но и схемы передачи нагрузок от оборудования на ствол сооружения. При этом в реальной инженерной практике полные сведения о фактическом



расположении оборудования и элементах его крепления доступны не всегда. При отсутствии полной информации о схеме крепления оборудования инженер вынужден задавать нагрузку укрупненно: не в фактические узлы крепления, а распределять суммарное усилие по узлам ближайшего яруса несущей конструкции. Такое упрощение удобно при построении расчетной модели, однако степень его влияния на результаты расчета сооружения изучена недостаточно. Это определяет актуальность настоящей работы.

Целью работы является оценка влияния степени детализации схемы передачи нагрузок от технологического оборудования на результаты расчета металлической решетчатой башни сотовой связи.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

1. Сформированы расчетные схемы металлической решетчатой башни с различными вариантами приложения нагрузок от оборудования.

2. Выполнено численное моделирование сооружения методом конечных элементов.

3. Проведено сопоставление коэффициентов использования несущей способности поясов, раскосов и распорок при точном и укрупненном приложении нагрузок.

4. Оценено влияние способа задания нагрузок на горизонтальные перемещения башни.

5. Выполнен анализ периодов и форм собственных колебаний сооружения.

6. Сформулированы рекомендации по области допустимого применения укрупненной схемы задания нагрузок, что составляет основную практическую значимость исследования.

Полученные результаты позволяют обосновать, в каких случаях такое упрощение может использоваться для оценки несущей способности сооружения, а в каких – способно привести к существенным отклонениям и требует более детализированного моделирования.

Методы исследования

Объектом исследования является металлическая решетчатая башня сотовой связи высотой 79,2 м, расположенная в Рязанской области Российской Федерации. Общий вид сооружения и его геометрическая схема приведены на рис. 1 цв. вклейки и рис. 1. Размеры элементов и сечения антенной опоры приняты согласно предоставленному техническому отчету.

Общее количество оборудования, размещенного и планируемого к размещению на АМС – 73 позиции, суммарная площадь оборудования составляет 32,00 м², суммарная масса – 1484,50 кг.

Климатические условия площадки строительства в соответствии с СП 20.13330.2016 «Свод правил. Нагрузки и воздействия»: ветровой район – I, тип местности – А, нормативное ветровое давление – 23,4 кгс/м²; гололедный район – II; сейсмичность района – до 6 баллов. В соответствии с табл. 2 ГОСТ Р 27751-2014 и п. 7 статьи 16 ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» башня относится к сооружениям повышенного уровня ответственности; коэффициент надежности по ответственности принят равным 1,1.

**К СТАТЬЕ Ю. Д. МАРКИНОЙ «ВЛИЯНИЕ ДЕТАЛИЗАЦИИ СХЕМЫ
ПЕРЕДАЧИ НАГРУЗОК ОТ ОБОРУДОВАНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА
МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТЧАТОЙ БАШНИ»**



Рис. 1. Общий вид башни высотой 79,2 м и установленного на ней оборудования

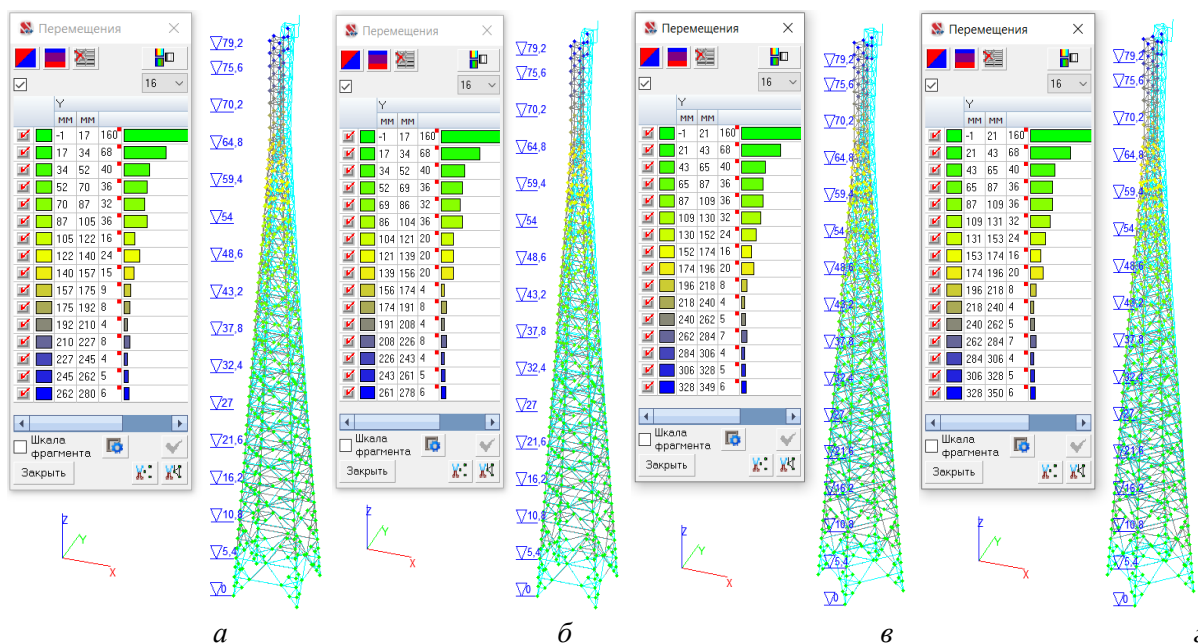


Рис. 2. Перемещения башни от комбинации нормативных нагрузок для расчетных случаев: *а* – PC1; *б* – PC2; *в* – PC3; *г* – PC4

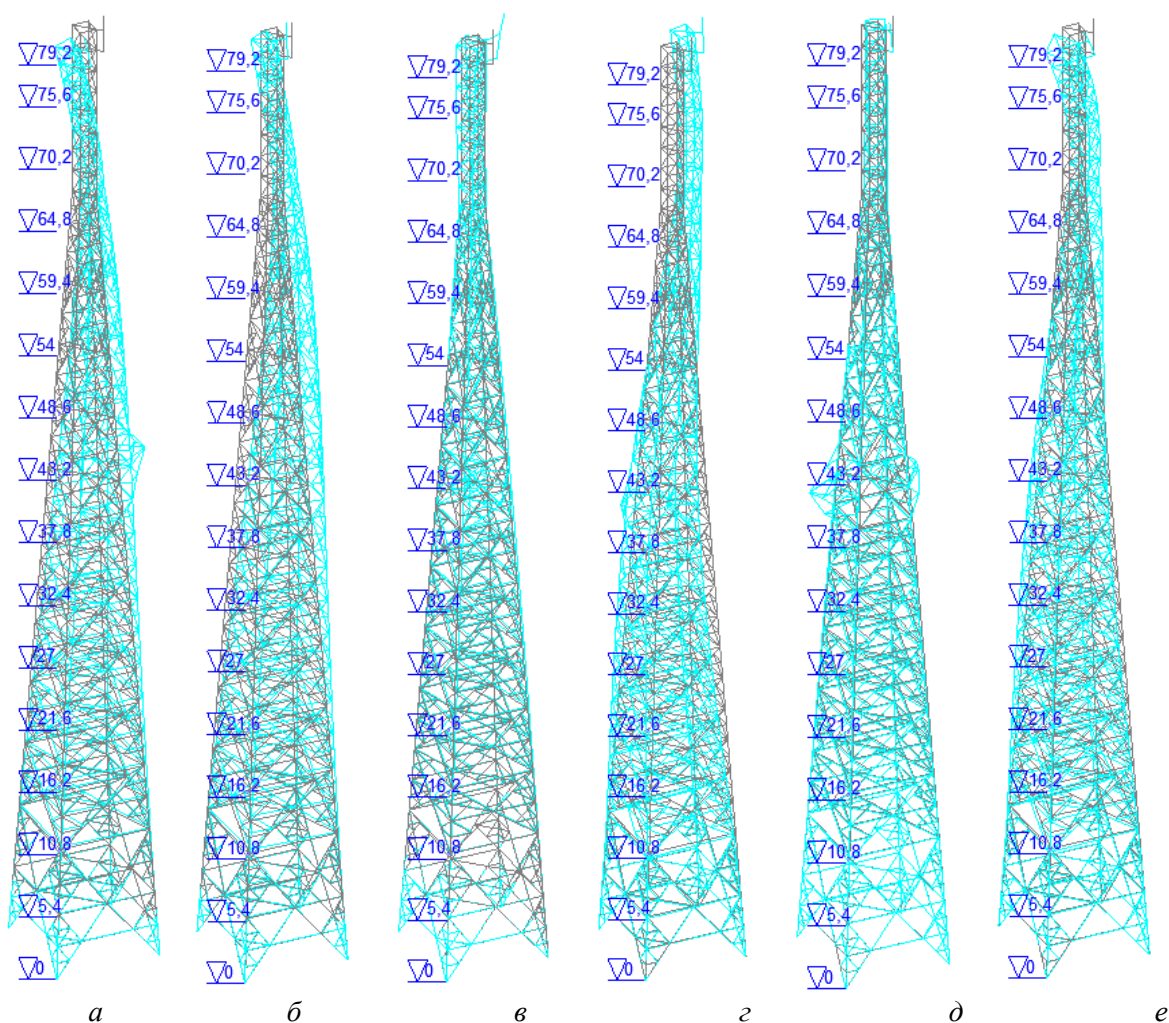


Рис. 3. Формы собственных колебания башни: *а* – PC1 форма 4; *б* – PC2 форма 4; *в* – PC1 форма 6; *г* – PC2 форма 6; *д* – PC1 форма 7; *е* – PC2 форма 7

A_i – наветренная площадь единицы оборудования с учетом креплений и трубостоек.

Для оценки влияния способа передачи нагрузки от оборудования были рассмотрены четыре расчетных случая:

- РС1 – точное приложение нагрузок от оборудования в узлы фактического крепления при расчетном направлении ветра $W1$ (рис. 2);
- РС2 – укрупненное приложение нагрузок от оборудования при расчетном направлении ветра $W1$ (рис. 2);
- РС3 – точное приложение нагрузок от оборудования в узлы фактического крепления при расчетном направлении ветра $W2$ (рис. 2);
- РС4 – укрупненное приложение нагрузок от оборудования при расчетном направлении ветра $W2$ (рис. 2).

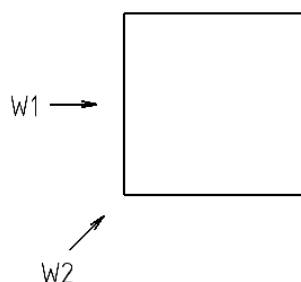


Рис. 2. Расчетные направления ветра

Под точным приложением нагрузки понималось задание весовых и ветровых усилий непосредственно в те узлы расчетной схемы, которые соответствуют фактическим местам крепления оборудования и элементов его подвеса. Под укрупненным приложением нагрузки понималось распределение суммарной нагрузки от оборудования, установленного на данной отметке, поровну по всем узлам поясов ближайшего сверху относительного фазового центра оборудования яруса без учета реальной схемы крепежных элементов. На отметках 35,1 м, 40,5 м и 75,6 м оборудование фактически крепится не к поясам, а к центрам распорок, что потенциально делает эти уровни наиболее чувствительными к переходу от точной схемы приложения нагрузки к укрупненной.

Расчет башни выполнялся в стержневой постановке как для пространственной статически неопределимой системы. В расчетной модели учитывались собственный вес конструкции, вес антенно-фидерных устройств, дополнительные весовые нагрузки от вспомогательных и соединительных элементов, статическая и динамическая составляющие ветрового воздействия, гололедные нагрузки.

Для сопоставления результатов расчета анализировались следующие параметры:

- 1) коэффициенты использования поясов;
- 2) коэффициенты использования раскосов;
- 3) коэффициенты использования распорок;
- 4) горизонтальные перемещения башни;
- 5) периоды первых десяти форм собственных колебаний.



Такой набор параметров позволял оценить как локальное влияние способа приложения нагрузки на отдельные элементы конструкции, так и глобальное влияние на общую деформативность и динамические характеристики сооружения.

Коэффициент использования несущей способности элемента определялся как отношение расчетного параметра, полученного по наиболее неблагоприятной нормативной проверке элемента на прочность, устойчивость и гибкость, к его допускаемому значению.

Для количественной оценки влияния укрупненного приложения нагрузок вычислялось относительное отклонение исследуемого параметра по отношению к результату, полученному при точном приложении нагрузки:

$$\delta = \frac{X_{\text{укр}} - X_{\text{точн}}}{X_{\text{точн}}} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где $X_{\text{укр}}$ – значение исследуемого параметра при укрупненном приложении нагрузки;

$X_{\text{точн}}$ – значение того же параметра при точном приложении нагрузки.

Сопоставление проводилось попарно: РС1–РС2 и РС3–РС4, что позволило исключить влияние изменения направления ветра на результаты сравнения и выделить именно эффект, обусловленный способом задания нагрузок от оборудования.

Результаты

Сравнительный анализ результатов расчета показал, что влияние способа задания нагрузок от оборудования на работу башни носит неоднородный характер и зависит как от типа рассматриваемого параметра, так и от конструктивной роли элемента в пространственной системе сооружения. Наиболее заметно различия проявляются в элементах, непосредственно вовлеченных в локальное перераспределение усилий в зонах размещения оборудования. Параметры, характеризующие общую работу сооружения: горизонтальные перемещения, реакции в опорах и низшие формы собственных колебаний, изменяются в меньшей степени.

Распределение коэффициентов использования поясов по высоте (рис. 3а) показывает, что данный тип элементов в наименьшей степени чувствителен к изменению схемы передачи нагрузок от оборудования. Расхождения между вариантами расчета с точным и укрупненным приложением нагрузок не превышают 3 % и не приводят к качественному изменению оценки их работы. Это объясняется тем, что пояса формируют основной несущий контур башни и воспринимают суммарное действие нагрузок в усредненном виде, вследствие чего локальные особенности приложения нагрузок от оборудования оказывают на них ограниченное влияние.

Для раскосов влияние способа задания нагрузок выражено несколько сильнее (рис. 3б), но не является определяющим для общей оценки напряженно-деформированного состояния. Изменение коэффициентов использования по высоте не превышает 6 %, имеет локальный характер и связано с перераспределением усилий между соседними панелями при переходе от точного приложения нагрузок в узлы фактического крепления оборудования к их укрупненной передаче на узлы ближайшего яруса. При этом общая картина работы раскосной системы сохраняется.

Наиболее выраженное влияние способа приложения нагрузок выявлено для распорок (рис. 3в). Максимальные локальные расхождения совпадают с уровнями,



на которых оборудование фактически крепится не к поясам, а к центрам распорок: на отм. 35,1 м – 14 %; на отм. 40,5 м – 49 %; на отм. 75,6 м – 14 %. В этих зонах укрупненное распределение нагрузки по узлам поясов ближайшего яруса в наибольшей степени искажает реальную схему передачи усилий. На остальных участках чувствительность распорок к перераспределению нагрузок существенно ниже: относительное отклонение не превышает 6 %, для большинства элементов составляет 0 %.

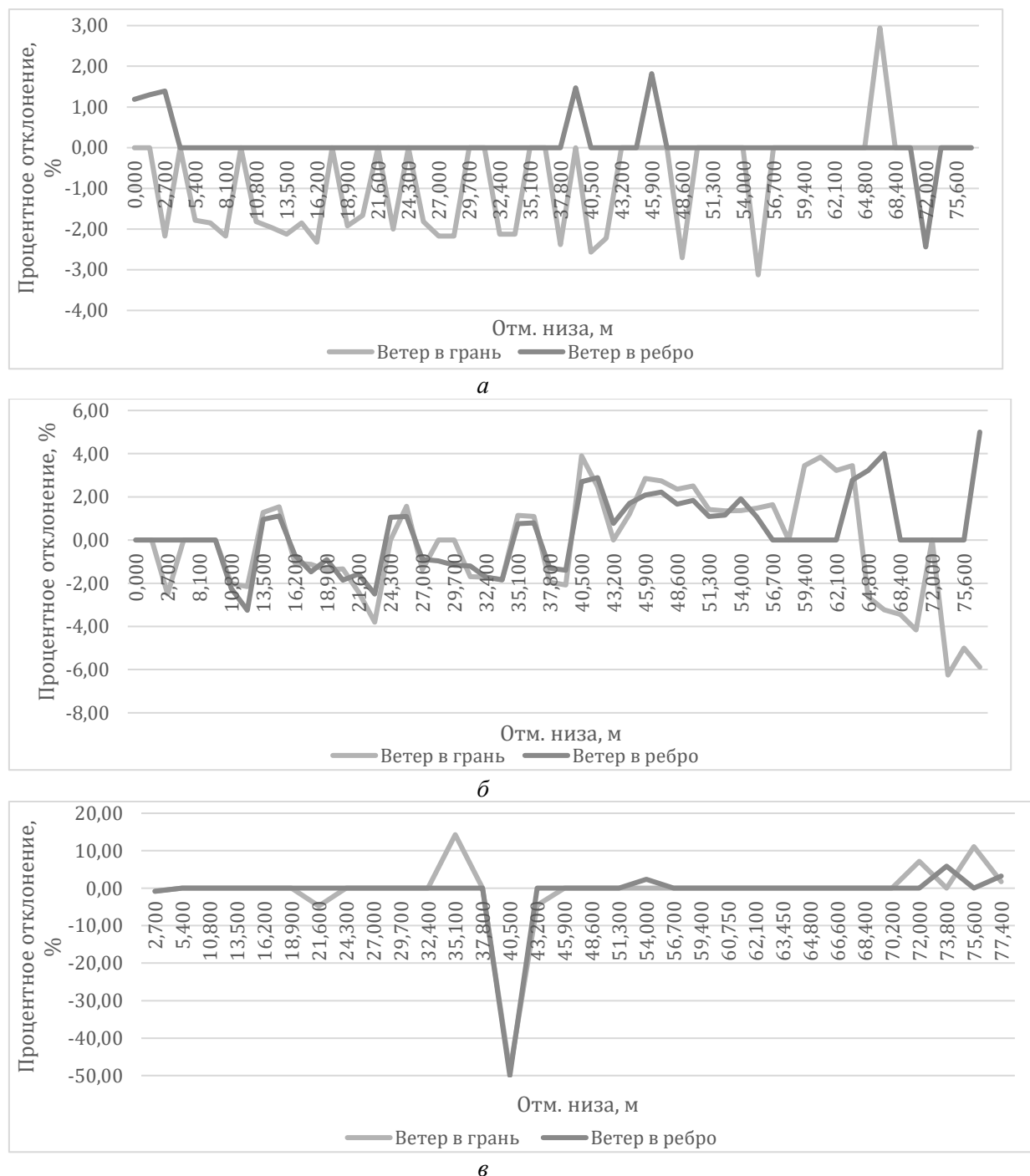


Рис. 3. Отклонение коэффициентов использования усилий при перераспределении нагрузок от оборудования: а – поясов; б – раскосов; в – распорок



Сопоставление горизонтальных перемещений (рис. 4 и рис. 2 цв. вклейки) показало, что изменение способа приложения нагрузок от оборудования практически не влияет на общую деформативность башни. Отклонение максимальных горизонтальных перемещений между рассматриваемыми расчетными случаями не превышает 2 %. Это свидетельствует о том, что для оценки глобальной жесткости сооружения и общей формы деформирования укрупненная схема задания нагрузок может использоваться без существенной потери точности.

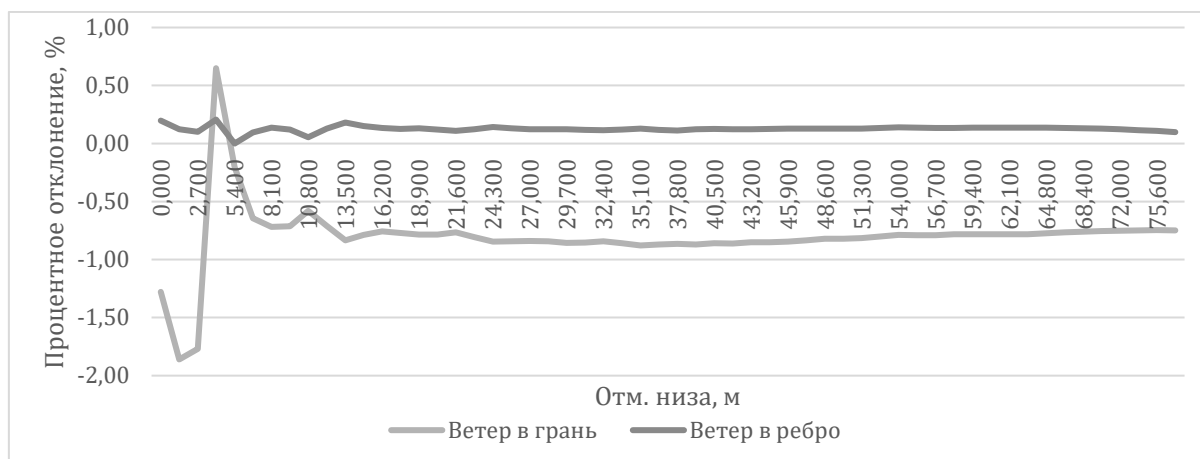


Рис. 4. Отклонение перемещений при перераспределении нагрузок от оборудования

Анализ периодов собственных колебаний (рис. 5 и табл.) показал, что влияние способа передачи нагрузок на динамические характеристики башни носит избирательный характер. Для первых форм, определяющих глобальную работу сооружения, различия между расчетными случаями незначительны. Это свидетельствует о том, что низшие изгибные формы в основном определяются общей геометрией, жесткостью и массой башни и антенно-фидерных устройств, а не локальными особенностями приложения нагрузок от оборудования. Для высших форм различия становятся более выраженными. Наибольшие отклонения периодов зафиксированы для 8–10-й форм, что указывает на чувствительность локальной динамики верхних ярусов к схеме передачи нагрузок. При этом наиболее характерные различия в конфигурации форм наблюдаются для 4-й, 6-й и 7-й форм (рис. 3 цв. вклейки). Следовательно, укрупненное приложение нагрузок практически не изменяет глобальную динамику сооружения, но может влиять на локальные формы колебаний, связанные с зонами размещения оборудования.

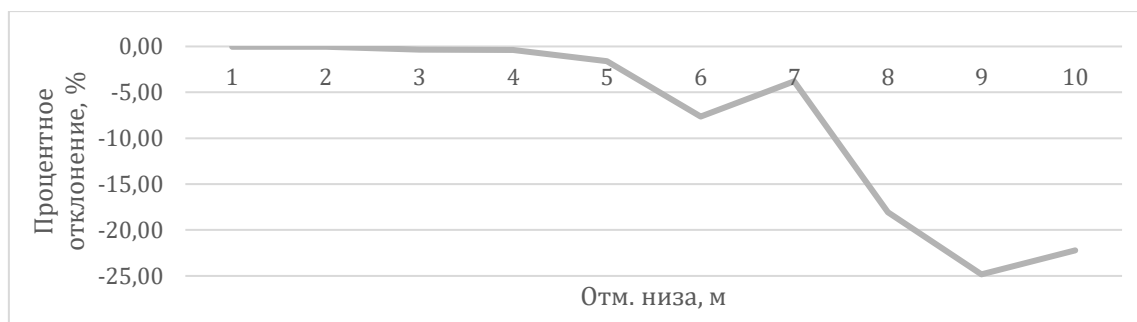


Рис. 5. Отклонение периодов собственных колебаний при перераспределении нагрузок от оборудования



Таблица

Периоды собственных колебаний башни для различных расчетных случаев

| Форма собственных колебаний | Период собственных колебаний, сек | | Процентное отклонение, % |
|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|-----------------------------|
| | PC1, PC3 | PC2, PC4 | |
| 1 | 1,1136 | 1,1131 | -0,04 |
| 2 | 1,1129 | 1,1125 | -0,04 |
| 3 | 0,392 | 0,3907 | -0,33 |
| 4 | 0,3897 | 0,3882 | -0,38 |
| 5 | 0,2129 | 0,2095 | -1,60 |
| 6 | 0,206 | 0,1903 | -7,62 |
| 7 | 0,1924 | 0,1851 | -3,79 |
| 8 | 0,1828 | 0,1498 | -18,05 |
| 9 | 0,1619 | 0,1217 | -24,83 |
| 10 | 0,1499 | 0,1166 | -22,21 |

Выводы

1. Схема передачи нагрузок от технологического оборудования является самостоятельным фактором, влияющим на результаты расчета металлической решетчатой башни сотовой связи.

2. Укрупненное приложение нагрузок слабо влияет на общую работу сооружения: горизонтальные перемещения, работу основных несущих элементов, реакции в опорах и низшие формы собственных колебаний изменяются незначительно. Поэтому такая схема может применяться при общей оценке несущей способности конструкции, предварительных расчетах, вариантном сравнении решений и экспресс-оценке работы башни.

3. Наибольшая чувствительность к способу задания нагрузок выявлена у элементов, участвующих в локальном перераспределении усилий в зонах размещения оборудования. В рассматриваемой башне это прежде всего распорки, к которым оборудование фактически крепится на отдельных отметках.

4. При детальной проверке элементов решетки в местах крепления оборудования, а также при уточнении высших форм собственных колебаний укрупненное приложение нагрузок не обеспечивает полной эквивалентности точной схеме и должно применяться с осторожностью.

5. Выбор степени детализации расчетной модели должен определяться целью расчета: для общей оценки допустимо укрупнение нагрузок, для локального анализа элементов и динамики верхних ярусов предпочтительно точное приложение нагрузок в фактические узлы крепления.

6. Полученные результаты подтверждают целесообразность дифференцированного подхода к формированию расчетных схем антенно-мачтовых сооружений, при котором степень детализации модели выбирается с учетом требуемой точности и характера решаемой задачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савицкий, Г. А. Расчет антенных сооружений. Физические основы / Г. А. Савицкий. – Москва : Связь, 1978. – 152 с.



2. Симиу, Э. Воздействие ветра на здания и сооружения / Э. Симиу, Р. Сканлан ; под редакцией Б. Е. Маслова. – Москва : Стройиздат, 1984. – 360 с.
3. Wu, P. Research on wind load characteristics on the surface of a towering precast television tower with a grid structure based on Large Eddy Simulation / P. Wu, G. Chen, R. Feng, F. He // *Buildings*. – 2022. – Vol. 12. – № 9. – Article 1428. – DOI 10.3390/buildings12091428.
4. Маркина, Ю. Д. Расчетные направления ветра при экспертизе несущей способности трехгранных антенно-мачтовых сооружений / Ю. Д. Маркина // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. – 2025. – Т. 21. – № 4. – С. 334–345. – DOI 10.22363/1815-5235-2025-21-4-334-345. – EDN CIVXMF.
5. Маркина, Ю. Д. Автоматизация сбора статической составляющей ветровой нагрузки на решетчатую башню / Ю. Д. Маркина // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. – 2025. – Т. 22. – № 9. – С. 23–30. – DOI 10.14489/vkit.2025.09.pp.023-030.
6. Кирсанов, М. Н. Деформации пространственной модели трехгранной стержневой башни с двойной решеткой / М. Н. Кирсанов // *Вестник МГСУ*. – 2023. – Т. 18. – Вып. 7. – С. 1032–1038. – DOI 10.22227/1997-0935.2023.7.1032-1038.
7. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – Москва : Стройиздат, 1978. – 216 с.
8. Tsavdaridis, K. D. Topology optimisation of lattice telecommunication tower and performance-based design considering wind and ice loads / K. D. Tsavdaridis, A. Nicolaou, A. D. Mistry, E. Efthymiou // *Structures*. – 2020. – Vol. 27. – P. 2379–2399. – DOI 10.1016/j.istruc.2020.08.010.
9. Kefal, A. Topology optimization of cracked structures using peridynamics / A. Kefal, A. Sohoul, E. Oterkus, M. Yildiz, A. Suleman // *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. – 2019. – Vol. 31. – P. 1645–1666. – DOI 10.1007/s00161-019-00804-w.
10. Голиков, А. В. Обобщенные принципы компоновки и назначения габаритных размеров трехгранных решетчатых башен / А. В. Голиков, Д. В. Веремеев // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. – 2023. – № 1 (90). – С. 14–32.
11. Облетов, Е. Н. Анализ и совершенствование конструкций стальных решетчатых башен: обзор / Е. Н. Облетов, Н. Ю. Трянина, Е. С. Зубанов, М. Г. Зайцева. – Текст : электронный // *Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет*. – Нижний Новгород, 2025. – № 2 (74). – С. 75–93. – URL: <https://pnj.nngasu.ru/word/articles/2-2025/7.pdf>.
12. Liu, M. Wind loads on square lattice towers with tubular members based on wind tunnel test and numerical simulation / M. Liu, S. Wu, W. Guan, C. Zhang, Z. Xie // *Physics of Fluids*. – 2024. – Vol. 36. – № 12. – Article 127129. – DOI 10.1063/5.0243306.
13. Khazaali, M. A robust protocol to compute wind load coefficients of telecommunication towers and antennas using numerical simulation for risk and resilience assessment / M. Khazaali, L. Ma, K. Rokneddin, M. Mazzotti, P. Bocchini // *Resilient Cities and Structures*. – 2024. – Vol. 3. – № 1. – P. 66–83. – DOI 10.1016/j.rcns.2024.02.001.
14. Маркина, Ю. Д. Влияние расположения технологического оборудования на результаты расчета цифровой модели башни сотовой связи / Ю. Д. Маркина // *Омский научный вестник*. – 2025. – № 4 (196). – С. 26–34. – DOI 10.25206/1813-8225-2025-196-26-34.
15. Zhang, D. Experimental and numerical study on the aerodynamic characteristics of steel tubular transmission tower bodies under skew winds / D. Zhang, X. Song, H. Deng, X. Hu, X. Ma // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2021. – Vol. 214. – Article 104678. – DOI 10.1016/j.jweia.2021.104678.
16. Мальков, Н. М. Постановка задачи численного моделирования процесса обтекания газоотводящих стволов вытяжных башен / Н. М. Мальков, Д. А. Кушова // *Вестник инженерной школы ДВФУ*. – 2012. – № 1 (10). – С. 121–124.

17. Маркина, Ю. Д. Автоматизация экспертизы несущей способности металлических решетчатых башен / Ю. Д. Маркина // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2026. – Т. 23. – № 3. – С. 27–34. – DOI 10.14489/vkit.2026.06.pp.027-034.

18. Gayatri, G. Comparative study of wind and ice loads on telecommunication towers in hilly terrain / G. Gayatri, B. T. Reddy, B. Narender // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 455. – Article 02021. – DOI 10.1051/e3sconf/202345502021.

19. Белаш, Т. А. Моделирование ветровой нагрузки для анализа аэродинамики опор двойного назначения с антеннами, установленными на них / Т. А. Белаш, Р. Р. Сафин // Вестник НИЦ «Строительство». – 2024. – № 2 (41). – С. 18–28.

20. Трянина, Н. Ю. Аэродинамическое воздействие на панельные антенны базовых станций / Н. Ю. Трянина, Е. Н. Облетов, И. А. Самохвалов // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2022. – № 1 (61). – С. 23–30. – EDN : NGWFXK.

MARKINA Yuliya Dmitrievna, candidate of technical sciences of the chair of theory of structures and technical mechanics

INFLUENCE OF THE LEVEL OF DETAIL IN THE LOAD TRANSFER SCHEME FROM EQUIPMENT ON THE ANALYSIS RESULTS OF A STEEL LATTICED TOWER

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia.

Tel.: (831) 430-54-96; e-mail: tstm@nngasu.ru, poluektoff@bk.ru

Key words: antenna-supporting structures, cellular communication tower, technological equipment, load-bearing capacity analysis, wind load, generalized load application, utilization factor, natural vibrations.

Cellular communication antenna-supporting structures are sensitive to the method used to define external actions, including loads from installed equipment. In engineering practice, such loads are often applied in a generalized manner, without accurately accounting for the actual attachment nodes; however, the influence of this simplification on the analysis results has not been sufficiently studied. The aim of this work is to assess the influence of the level of detail of the computational model on the stress-strain state of a steel cellular communication tower. The study was carried out using the finite element method in SCAD Office software. The results of two modeling approaches were compared: precise application of equipment loads to the actual attachment nodes and their generalized distribution to the chord nodes of the nearest panel. The utilization factors of structural members, horizontal displacements, and the periods and mode shapes of natural vibrations were analyzed. It was found that generalized load application is acceptable for an overall assessment of the structural behavior; however, for analyzing the local behavior of lattice members to which the equipment is attached and for refining the dynamic characteristics of the structure, precise load application is preferable.

REFERENCES

1. Savitskiy G. A. Raschet antennykh sooruzheniy. Fizicheskie osnovy [Calculation of antenna structures. Physical foundations]. Moscow, Svyaz, 1978, 152 p.

2. Simiu E., Skanlan R. Vozdeystvie vetra na zdaniya i sooruzheniya [Wind effects on structures]. pod red. B. E. Maslova. Moscow, Stroyizdat, 1984, 360 p.



3. Wu P., Chen G., Feng R., He F. Research on wind load characteristics on the surface of a towering precast television tower with a grid structure based on Large Eddy Simulation. *Buildings*. 2022, Vol. 12, № 9, article 1428. DOI: 10.3390/buildings12091428.
4. Markina Yu. D. Raschetnye napravleniya vetra pri ekspertize nesushhey sposobnosti trekhgrannykh antenno-machtovykh sooruzheniy [Calculated wind directions in the load-bearing capacity assessment of triangular antenna-supporting structures]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsey i sooruzheniy* [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings]. 2025, Vol. 21, № 4, P. 334–345. DOI: 10.22363/1815-5235-2025-21-4-334-345. EDN: CIVXMF.
5. Markina Yu. D. Avtomatizatsiya sbora staticheskoy sostavlyayushhey vetrovoy nagruzki na reshetchatuyu bashnyu [Automation of collecting the static component of wind load on a lattice tower]. *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Herald of Computer and Information Technologies]. 2025, Vol. 22, № 9, P. 23–30. DOI: 10.14489/vkit.2025.09.pp.023-030.
6. Kirsanov M. N. Deformatsii prostranstvennoy modeli trekhgrannoy sterzhnevoy bashni s dvoynoy reshetkoy [Deformations of a spatial model of a triangular rod tower with double lattice]. *Vestnik MGSU*, 2023, Vol. 18, Issue 7, P. 1032–1038. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1032-1038.
7. Rukovodstvo po raschetu zdaniy i sooruzheniy na deystvie vetra [Guide to the calculation of buildings and structures under wind action]. TsNIISK im. V.A. Kucherenko. Moscow, Stroyizdat, 1978, 216 p.
8. Tsavdaridis K. D., Nicolaou A., Mistry A. D., Efthymiou E. Topology optimisation of lattice telecommunication tower and performance-based design considering wind and ice loads. *Structures*. 2020, Vol. 27, P. 2379–2399. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.08.010.
9. Kefal A., Sohoulis A., Oterkus E., Yildiz M., Suleman A. Topology optimization of cracked structures using peridynamics. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2019, Vol. 31, P. 1645–1666. DOI: 10.1007/s00161-019-00804-w.
10. Golikov A. V., Veremeev D. V. Obobshchennyye printsipy komponovki i naznacheniya gabaritnykh razmerov trekhgrannykh reshetchatykh bashen [Generalized principles of layout and assignment of overall dimensions of triangular lattice towers]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture]. 2023, № 1 (90), P. 14–32.
11. Obletov E. N., Tryanina N. Yu., Zubanov E. S., Zaytseva M. G. Analiz i sovershenstvovanie konstruktsey stalnykh reshetchatykh bashen: obzor [Analysis and improvement of steel lattice tower structures: Review]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal]. 2025, № 2 (74), P. 75–93.
12. Liu M., Wu S., Guan W., Zhang C., Xie Z. Wind loads on square lattice towers with tubular members based on wind tunnel test and numerical simulation. *Physics of Fluids*. 2024, Vol. 36, № 12, article 127129. DOI: 10.1063/5.0243306.
13. Khazaali M., Ma L., Rokneddin K., Mazzotti M., Bocchini P. A robust protocol to compute wind load coefficients of telecommunication towers and antennas using numerical simulation for risk and resilience assessment. *Resilient Cities and Structures*. 2024, Vol. 3, № 1, P. 66–83. DOI: 10.1016/j.rcns.2024.02.001.
14. Markina Yu. D. Vliyanie raspolozheniya tekhnologicheskogo oborudovaniya na rezultaty rascheta tsifrovoy modeli bashni sotovoy svyazi [Influence of technological equipment arrangement on the calculation results of a digital model of a cellular communication tower]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. 2025, № 4 (196), P. 26–34. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-26-34.
15. Zhang D., Song X., Deng H., Hu X., Ma X. Experimental and numerical study on the aerodynamic characteristics of steel tubular transmission tower bodies under skew winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021, Vol. 214, article 104678. DOI: 10.1016/j.jweia.2021.104678.



16. Malkov N. M., Kushova D. A. Postanovka zadachi chislennogo modelirovaniya processa obtekaniya gazootvodyashhikh stvolov vytyazhnykh bashen [Problem statement for numerical modeling of the flow around exhaust shafts of ventilation towers]. Vestnik inzhenernoy shkoly DVFU [FEFU: School of Engineering Bulletin]. 2012, № 1 (10), P. 121–124.
17. Markina Yu. D. Avtomatizatsiya ekspertizy nesushhey sposobnosti metallicheskh reshchatykh bashen [Automation of load-bearing capacity assessment of steel lattice towers]. Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologiy [Herald of Computer and Information Technologies]. 2026, Vol. 23, № 3, P. 27–34. DOI: 10.14489/vkit.2026.06.pp.027-034.
18. Gayatri G., Reddy B. T., Narender B. Comparative study of wind and ice loads on telecommunication towers in hilly terrain. E3S Web of Conferences. 2023, Vol. 455, article 02021. DOI: 10.1051/e3sconf/202345502021.
19. Belash T. A., Safin R. R. Modelirovanie vetrovoy nagruzki dlya analiza aerodinamiki opor dvoynogo naznacheniya s antennami, ustanovlennymi na nikh [Modeling of wind load for aerodynamic analysis of dual-purpose supports with antennas installed on them]. Vestnik NITs Stroitelstvo [Bulletin of the Scientific Research Center of Construction]. 2024, № 2 (41), P. 18–28.
20. Tryanina N. Yu., Obletov E. N., Samokhvalov I. A. Aerodinamicheskoe vozdeystvie na panelnye anteny bazovykh stantsiy [Aerodynamic action on panel antennas of base stations]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. 2022, № 1 (61), P. 23–30. EDN: NGWFXK.

© Ю. Д. Маркина, 2026

Получено: 28.04.2026 г.



УДК 534.1

В. И. ЕРОФЕЕВ, д-р физ.-мат. наук, проф., директор; **Н. И. МОЛОДУШНАЯ**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; **Е. А. НИКИТИНА**, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник

ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗГИБНЫХ ВОЛН В БАЛКЕ БЕРНУЛЛИ-ЭЙЛЕРА С УЧЕТОМ РЕЛАКСАЦИИ ТЕПЛОВЫХ И ДИФФУЗИОННЫХ ПОТОКОВ

Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова–Грехова Российской академии наук».

Россия, 603024, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, д. 85.

Тел.: (831) 432-03-00; эл. почта: erof.vi@yandex.ru; united-friends@bk.ru; nikitina.ea.nn@gmail.com

Ключевые слова: балка Бернулли-Эйлера, термомеханодиффузия, изгибные волны, дисперсия, частота, фазовая скорость, групповая скорость, «эффект обратной волны».

В статье представлены результаты исследования влияния релаксации тепловых и диффузионных потоков, происходящей в материале балки, на дисперсионные характеристики распространяющихся по ней изгибных волн. Получены аналитические выражения для частоты волны, фазовой и групповой скоростей. Показано, что фазовая и групповая скорости могут иметь противоположные знаки («эффект обратной волны»). Приведен расчетный пример для случая, когда материал балки является двухкомпонентной средой из дюралюминия.

Введение

В настоящее время существует много моделей, обобщающих классическую модель термомеханодиффузии. В публикациях [1, 2] исследуется модель нестационарных термомеханодиффузионных колебаний балки, основанная на гипотезах Бернулли-Эйлера, и предлагается метод решения, основанный на использовании преобразования Лапласа и разложения в ряды Фурье. Напомним, что в классической теории Я. Бернулли и Л. Эйлера предполагается, что: 1) поперечные сечения балки, плоские и перпендикулярные оси балки до деформации, во время изгиба остаются плоскими и перпендикулярными ее деформированной оси; 2) нормальные напряжения на площадках, параллельных оси, пренебрежимо малы, т. е. продольные сечения сопротивляются изгибу независимо, не оказывая друг на друга влияния; 3) инерцией вращения элемента балки при изгибе пренебрегается [3, 4].

Данная работа посвящена исследованию дисперсионных свойств балки Бернулли-Эйлера с учетом релаксации тепловых и диффузионных потоков.

1. Постановка задачи и метод решения

Рассматривается задача о распространении изгибных волн в балке Бернулли-Эйлера с учетом тепломассопереноса [1, 2, 5, 6]. Балка считается бесконечной и выполненной из однородного материала [1].

Сформулированная задача описывается системой дифференциальных уравнений [1]:



$$\begin{aligned}
\frac{\partial^4 V}{\partial x^4} + a \frac{\partial^2 V}{\partial \tau^2} + b_1 \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \alpha_1^1 \frac{\partial^2 H_1}{\partial x^2} &= 0, \\
\tau_0^1 \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \tau^2} + v^1 \frac{\partial^2 H_1}{\partial \tau^2} - \aleph_1^1 \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} &= 0, \\
\tau_1^1 \frac{\partial^2 H_1}{\partial \tau^2} - D_1^1 \frac{\partial^2 H_1}{\partial x^2} - \Lambda_{11}^1 \frac{\partial^4 V}{\partial x^4} - M_1^1 \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} &= 0
\end{aligned} \quad (1)$$

В (1) введены обозначения: $V(x, \tau)$ – поперечное перемещение балки; $\Theta(x, \tau)$ – температура; $H(x, \tau)$ – масса; $a = \frac{F}{J_3}$, где F – площадь сечения; J_3 – момент инерции балки относительно оси Ox ; $b_1, \alpha_1^1, \tau_0^1, v^1, \aleph_1^1, \tau_1^1, D_1^1, \Lambda_{11}^1, M_1^1$ – безразмерные величины. Описание безразмерных величин представлено в Приложении А.

Для исследования дисперсионных свойств системы (1) представим искомые функции $V(x, \tau), \Theta(x, \tau), H(x, \tau)$ в комплексной форме гармонических волн [7]:

$$V = V_0 e^{i(\omega\tau - kx)}, \Theta = \Theta_0 e^{i(\omega\tau - kx)}, H = H_0 e^{i(\omega\tau - kx)} \quad (2)$$

Подставляя соотношения (2) в (1), получим систему алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned}
V_0 k^4 - a V_0 \omega^2 - b_1 \Theta_0 k^2 - \alpha_1^1 H_0 k^2 &= 0 \\
\aleph_1^1 \Theta_0 k^2 - \tau_0^1 \omega^2 - \tau_0^1 v^1 H_0 \omega^2 &= 0 \\
\tau_1^1 H_0 \omega^2 - D_1^1 H_0 k^2 + \Lambda_{11}^1 V_0 k^4 - M_1^1 \Theta_0 k^2 &= 0
\end{aligned} \quad (3)$$

Приравнявая к нулю детерминант системы (3) (Приложение Б), получаем дисперсионное уравнение:

$$\begin{aligned}
(k^4 - a\omega^2)(\aleph_1^1 k^2 - \tau_0^1 \omega^2)(\tau_1^1 \omega^2 - D_1^1 k^2) + \Lambda_{11}^1 b_1 k^6 \tau_0^1 v^1 \omega^2 + \\
+ \Lambda_{11}^1 \alpha_1^1 k^6 (\aleph_1^1 k^2 - \tau_0^1 \omega^2) - (k^4 - a\omega^2) \tau_0^1 v^1 \omega^2 M_1^1 k^2 = 0
\end{aligned} \quad (4)$$

Тогда:

$$\begin{aligned}
\omega^2 = t \\
t^3 + \left(-\frac{k^4}{a} - \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} - \frac{\aleph_1^1 k^2}{\tau_0^1} + \frac{v^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1} \right) t^2 + \\
+ \left(\frac{D_1^1 k^6}{a \tau_1^1} + \frac{\aleph_1^1 k^6}{a \tau_0^1} + \frac{\aleph_1^1 D_1^1 k^4}{\tau_0^1 \tau_1^1} + \frac{\Lambda_{11}^1 b_1 v^1 k^6}{a \tau_1^1} - \frac{\Lambda_{11}^1 \alpha_1^1 k^6}{a \tau_1^1} - \frac{v^1 M_1^1 k^6}{a \tau_1^1} \right) t + \\
+ \left(\frac{\Lambda_{11}^1 \alpha_1^1 \aleph_1^1}{a \tau_0^1 \tau_1^1} - \frac{\aleph_1^1 D_1^1}{a \tau_0^1 \tau_1^1} \right) k^8 = 0
\end{aligned} \quad (5)$$

Подробное решение уравнения (5) представлено в Приложении В. Отсюда частота будет представлена в виде:



$$\begin{aligned}
 \omega_1 &= \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} - \frac{\frac{k^4}{a} - \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} - \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} + \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1}}{3} = \\
 &= \sqrt[3]{-\frac{2k^{12}}{27a^3} + Jk^{10} + Wk^8 + Fk^6} + \sqrt{Pk^{22} + Gk^{20} + Ek^{18} + Zk^{16} + Rk^{14} + Ck^{12}} + \\
 &= \sqrt[3]{-\frac{2k^{12}}{27a^3} + Jk^{10} + Wk^8 + Fk^6} - \sqrt{Pk^{22} + Gk^{20} + Ek^{18} + Zk^{16} + Rk^{14} + Ck^{12}} - \frac{\frac{k^4}{a} - \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} - \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} + \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1}}{3} \quad (6) \\
 \omega_2 &= \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} + i \frac{\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}}{2} \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}} \sqrt{3} - \frac{\frac{k^4}{a} - \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} - \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} + \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1}}{3} \\
 \omega_3 &= \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} - i \frac{\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}}{2} \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}} \sqrt{3} - \frac{\frac{k^4}{a} - \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} - \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} + \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1}}{3}
 \end{aligned}$$

Из (6) видно, что частота является комплексной $\omega = \omega' + i\omega''$, где $\omega' = \text{Re}(\omega)$ – действительная часть частоты, $\omega'' = \text{Im}(\omega)$ – мнимая часть частоты. Аналитический вид действительной и мнимой частей частоты, а также принятые в (6) обозначения, представлены в Приложении Г.

Качественный вид дисперсионных зависимостей приведен на рис. 1, 2:

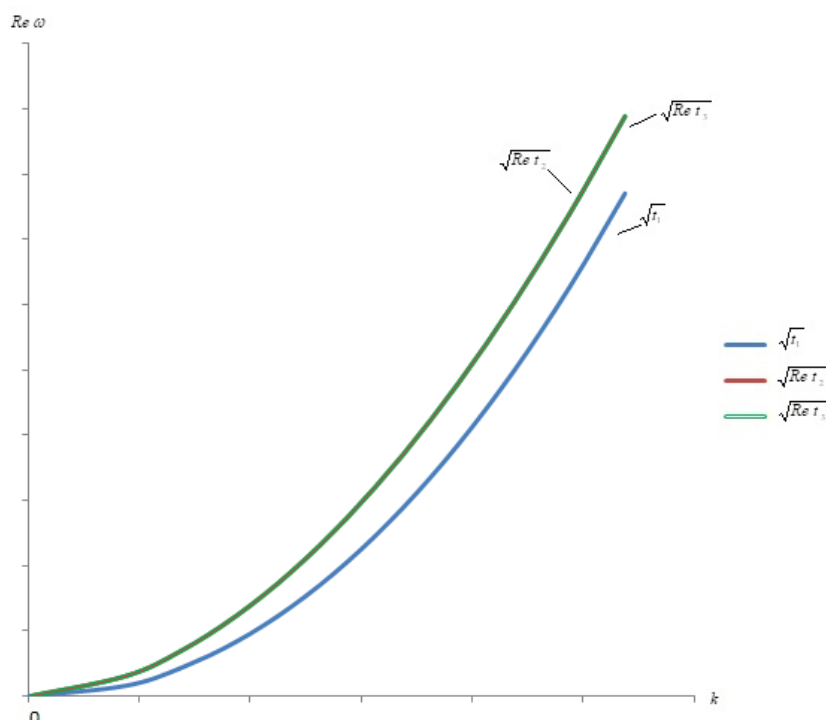


Рис. 1. Зависимость действительной части частоты от волнового числа

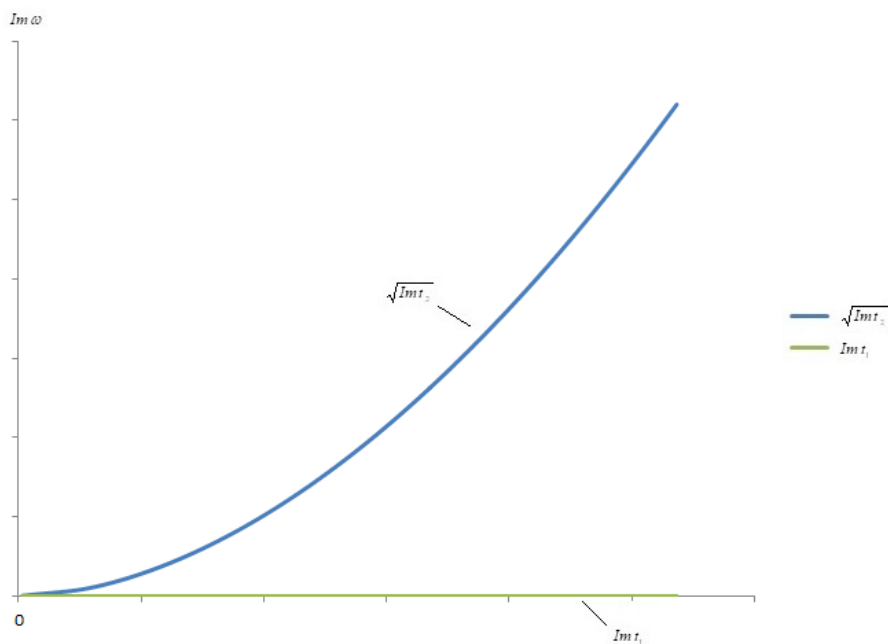


Рис. 2. Зависимость мнимой части частоты от волнового числа

Аналитический вид фазовых и групповых скоростей [8] представлен в Приложении Д.

На рис. 3 представлена зависимость фазовой скорости от волнового числа:

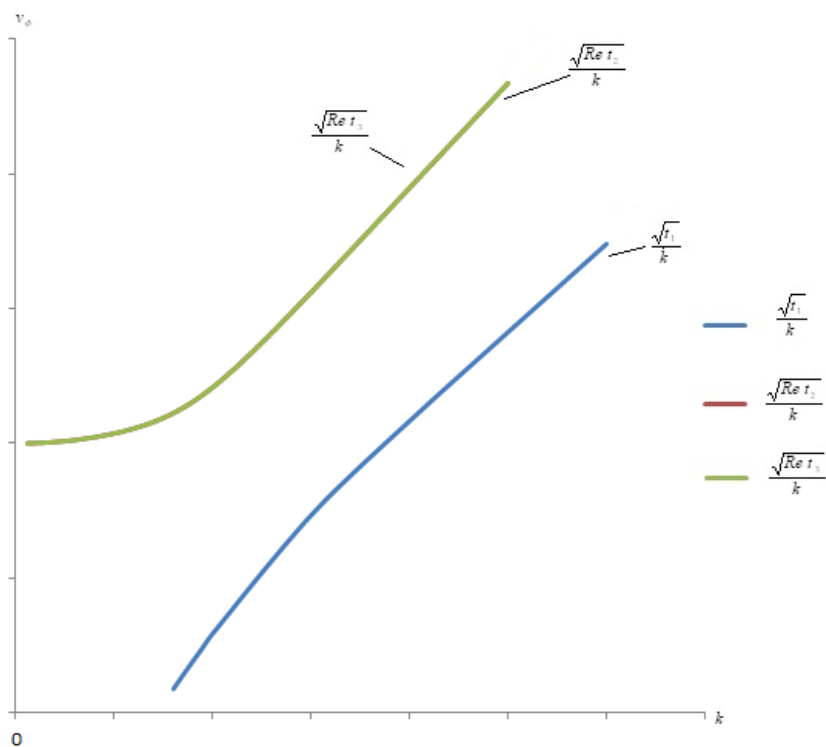


Рис. 3. Зависимость фазовой скорости от волнового числа

На рис. 4 представлена зависимость групповой скорости от волнового числа:

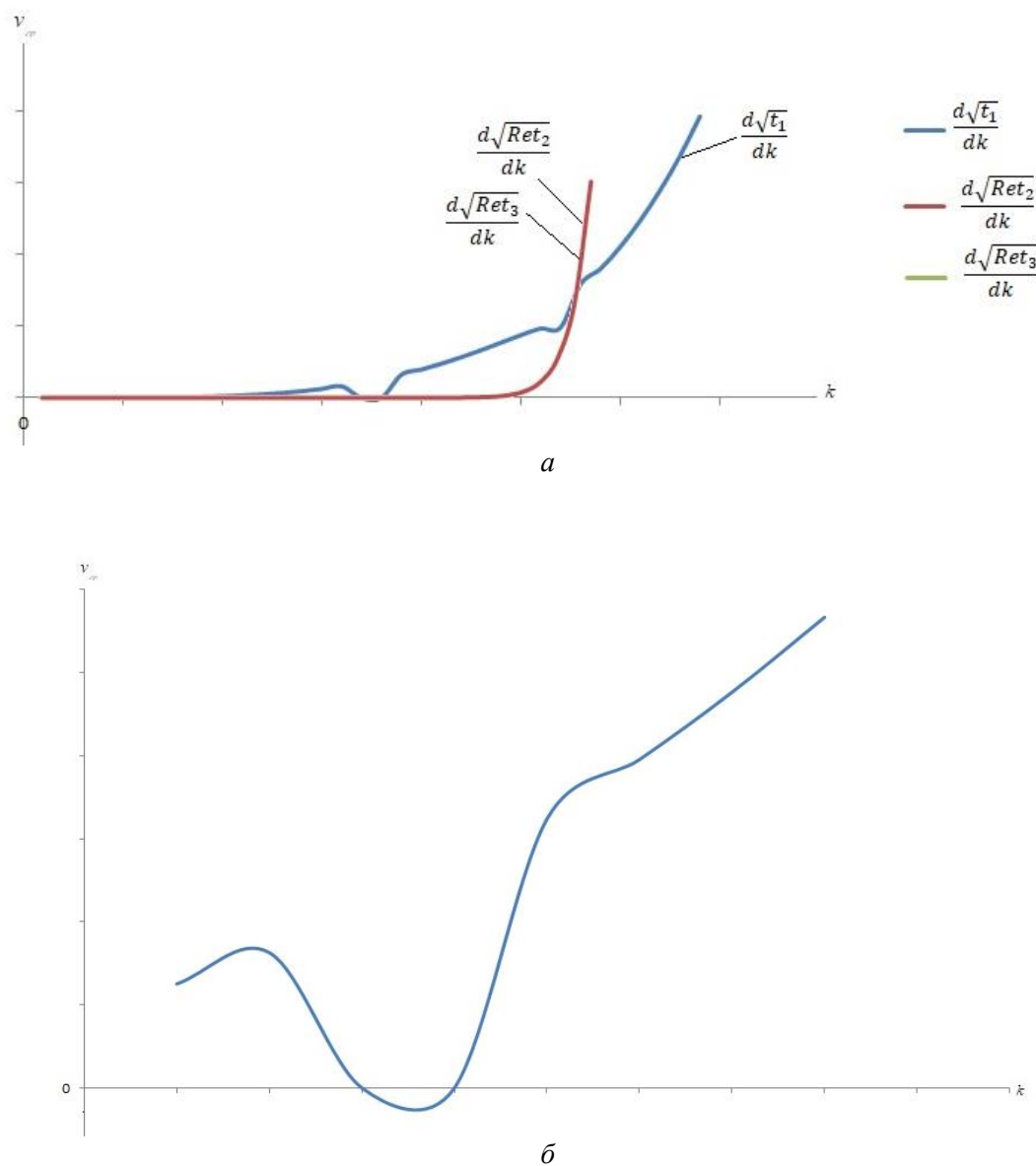


Рис. 4. Зависимость групповой скорости от волнового числа

Обратим внимание, что на рис. 3 и 4 представлены противоположные направления фазовой и групповой скоростей в балке. Такая ситуация называется «эффектом обратной волны» и описывается в статьях [9, 10] и книге [8].

2. Пример

Если при построении графиков взять за основу дюралюминий 2024 [1, 11], безразмерные величины будут равны:

$$M_1^1 = -7.24 * 10^{-4}$$

$$\Lambda_{11}^1 = 8.91 * 10^{-15}$$

$$D_1^1 = 3.29 * 10^{-15}$$

$$\alpha_1^1 = 4.41 * 10^{-6}$$

$$\aleph_1^1 = 9.65 * 10^{-6}$$

$$b_1^1 = 1.38 * 10^{-2}$$

$$a = 4.8 * 10^7$$

$$\tau_0^1 = 6.37 * 10^{-2}$$

$$\tau_1^1 = 1.27 * 10^5$$

$$T_0 = 600K$$

$$v^1 = -7.12$$

Качественный вид дисперсионных зависимостей приведен на рис. 5–8:

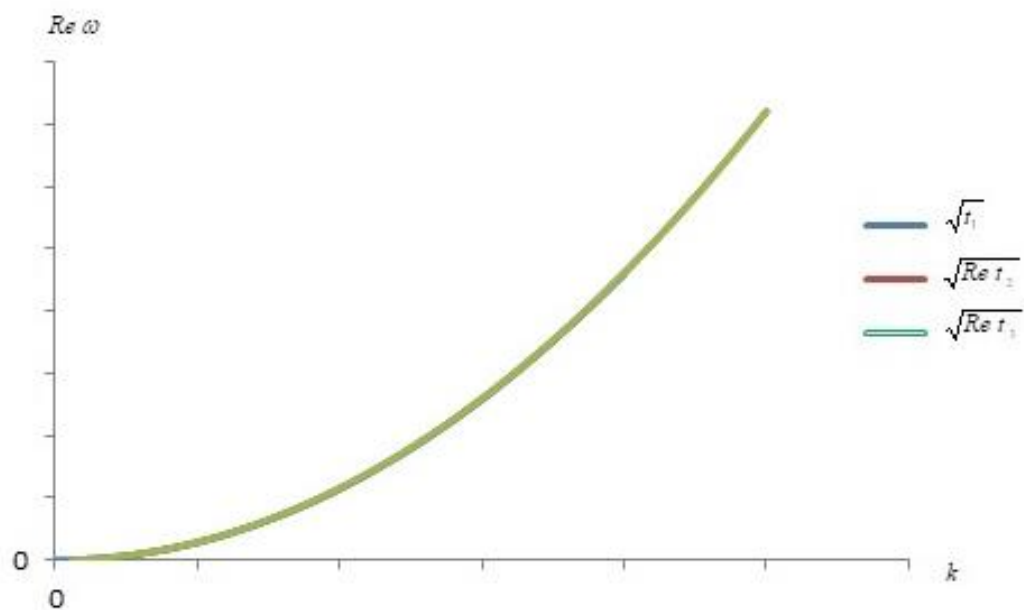


Рис. 5. Зависимость действительной части частоты от волнового числа

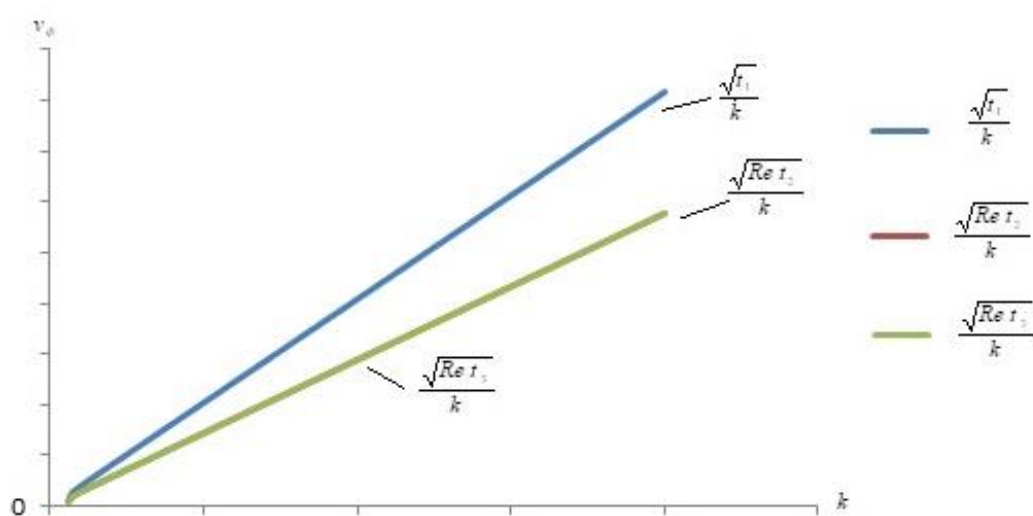


Рис. 6. Зависимость фазовой скорости от волнового числа

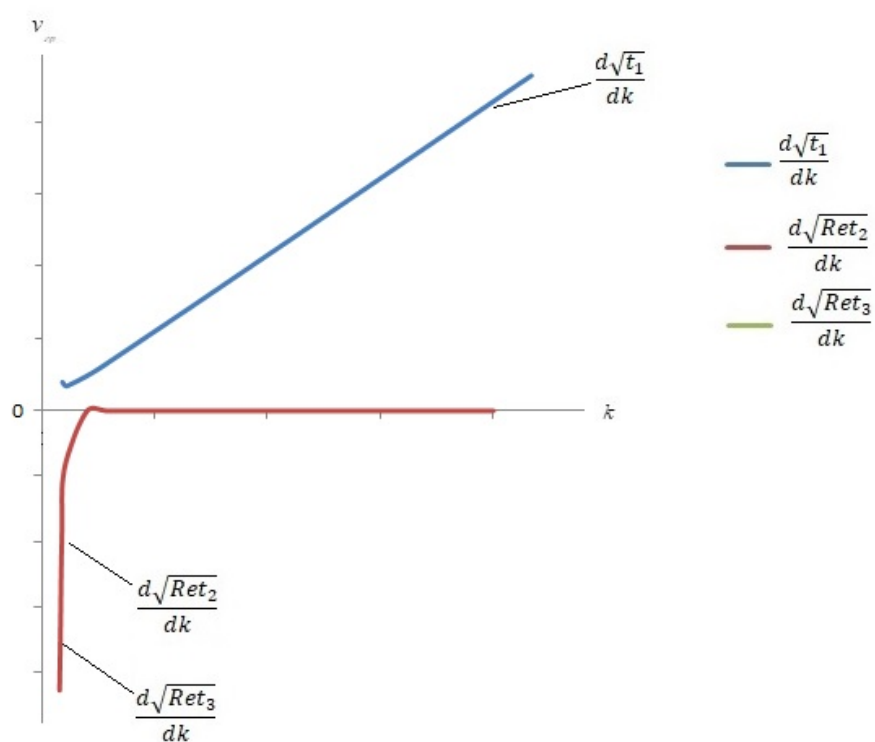


Рис. 7. Зависимость групповой скорости от волнового числа

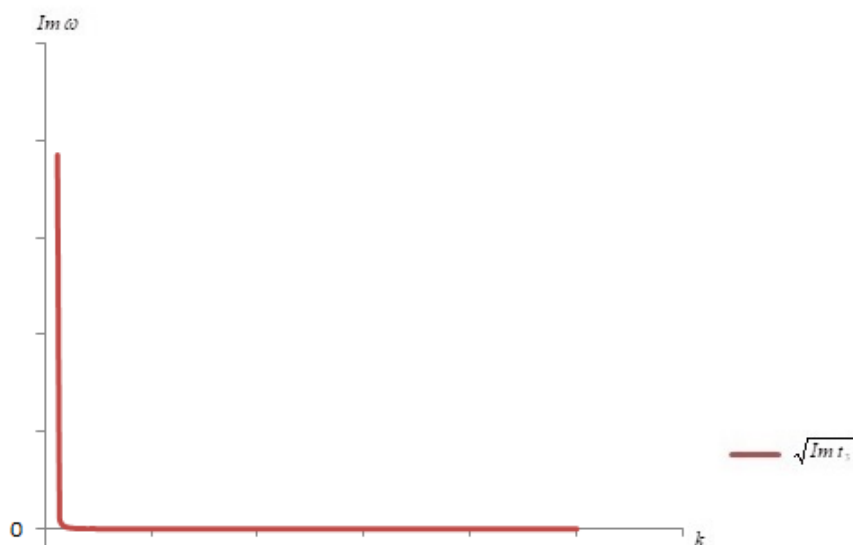


Рис. 8. Зависимость мнимой части частоты от волнового числа

Заключение

Проведенное исследование показало, что учет тепловых и диффузионных потоков в материале балки приводит к затуханию диспергирующей изгибной волны, зависящему от длины волны. Кроме того, выбранная модель позволяет описать «эффект обратной волны» [10], при котором, несмотря на то, что фазовая скорость направлена в положительном направлении оси x , энергия в такой волне переносится в отрицательном направлении.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2024–2026 гг. (FFUF-2024-0031, № НИОКТР 1023032800130-3-2.3.2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Земсков, А. В. Нестационарные термоупругодиффузионные колебания балки Бернулли-Эйлера под воздействием распределенной поперечной нагрузки / А. В. Земсков, Ле Ван Хао // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2023. – № 3. – С. 75–85.
2. Земсков, А. В. Модель нестационарного изгиба балки Бернулли-Эйлера с учетом тепломассопереноса / А. В. Земсков, Ле Ван Хао // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред : сборник трудов 11-й Всероссийской научной конференции с международным участием, Москва, 23–25 ноября 2021. – Москва : Сам Полиграфист, 2021. – С. 280–289.
3. Вибрации в технике : справочник. В 6 томах. Том 1. Колебания линейных систем. – 2-е изд., испр. и доп. / под редакцией В. В. Болотина. – Москва : Машиностроение, 1999. – 504 с. : ил. – ISBN 5-217-02898-X.
4. Весницкий, А. И. Волны в системах с движущимися границами и нагрузками / А. И. Весницкий. – Москва : Физматлит, 2001. – 320 с. – ISBN 5-9221-0172-2.
5. Ле Ван Хао. Моделирование нестационарных термодиффузионных колебаний балки Бернулли-Эйлера : специальность 1.1.8 : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Ле Ван Хао ; [Место защиты: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)]. – Москва, 2025. – 112 с.



6. Давыдов, С. А. Анализ напряженно-деформированного состояния упругих сред с учетом тепломассопереноса: специальность 01.02.04 : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Давыдов Сергей Андреевич ; [Место защиты : Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)]. – Москва, 2020. – 120 с.

7. Ерофеев, В. И. Волны в стержнях. Дисперсия. Диссипация. Нелинейность / В. И. Ерофеев, В. В. Кажаев, Н. П. Семерикова. – Москва : Физматлит, 2002. – 208 с. – ISBN 5-9221-0294- X.

8. Гринченко, В. Т. Гармонические колебания и волны в упругих телах / В. Т. Гринченко, В. В. Мелешко. – Киев : Наукова думка, 1981. – 284 с.

9. Сравнительный анализ динамического поведения балок моделей Бернулли-Эйлера, Рэлея и Тимошенко, лежащих на упругом основании / В. И. Ерофеев, В. В. Кажаев, Е. Е. Лисенкова, Н. П. Семерикова // Вестник научно-технического развития. – Москва, 2009. – № 8 (24). – С. 18–26.

10. Макаров, В. П. Об электромагнитных волнах с отрицательной групповой скоростью / В. П. Макаров, А. А. Рухадзе, А. А. Самохин // Прикладная физика. – 2009. – № 4. – С. 19–30.

11. Физические величины: справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский [и др.] ; под редакцией И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с. – ISBN 5-283-04013-5.

EROFEEV Vladimir Ivanovich, doctor of physical and mathematical sciences, professor, director; MOLODUSHNAYA Natalia Igorevna, candidate of physical and mathematical sciences, senior researcher; NIKITINA Elena Aleksandrovna, candidate of physical and mathematical sciences, senior researcher

DISPERSION CHARACTERISTICS OF FLEXURAL WAVES IN A BERNOULLI-EULER BEAM WITH ACCOUNT FOR RELAXATION OF THERMAL AND DIFFUSION FLUXES

Mechanical Engineering Research Institute of RAS – branch of Federal Research Center A. V. Gaponov–Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences.

85, Belinskogo St., Nizhny Novgorod, 603024, Russia.

Tel.: (831) 432-03-00; e-mail: erof.vi@yandex.ru; united-friends@bk.ru; nikitina.ea.nn@gmail.com

Key words: Bernoulli-Euler beam, thermomechanical diffusion, flexural waves, dispersion, frequency, phase velocity, group velocity, "backward wave effect."

This article presents the results of a study examining the influence of thermal and diffusion flux relaxation in a beam material on the dispersion characteristics of flexural waves propagating within it. Analytical expressions are derived for the wave frequency, phase velocity, and group velocity. It is shown that the phase and group velocities can have opposite signs (the "backward wave effect"). A calculation example is provided for a beam material consisting of a two-component medium made of duralumin.

REFERENCES

1. Zemskov A. V., Hao Le Van. Nestatsionarnyye termouprugodiffuzionnyye kolebaniya balki Bernulli-Eйлера pod vozdeystviyem raspredelennoy poperechnoy nagruzki [Unsteady thermoelastic diffusion vibrations of the Bernoulli-Euler beam under the action of a distributed



transverse load]. Vestnik PNIPU. Mekhanika [PNRPU Mechanics Bulletin]. 2023, № 3, P. 75–85.

2. Zemskov A. V., Hao Le Van. Model nestatsionarnogo izgiba balki Bernulli-Eylera s uchetom teplomassoperenosa [Model of unsteady bending of a Bernoulli-Euler beam taking into account heat and mass transfer]. Mekhanika kompozitsionnikh materialov i konstruktсий, slozhnikh i geterogennikh sred [Mechanics of Composite Materials and Structures, Complex and Heterogeneous Media]: sbornik trudov 11 Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhduнародnim uchastiem, 23–25 noyabrya 2021. Moscow, Sam Poligrafist, 2021, P. 280–289.

3. Vibratsii v tekhnike [Vibrations in Engineering]: spravochnik. V 6-ti tomakh. Kolebaniya lineynykh system [Oscillations of Linear Systems]. 2-ye izd., ispr. i dop. pod red. Bolotina V.V. Vol. 1, Moscow, Mashinostroenie, 1999, 504 p.: ill. ISBN 5-217-02898-X.

4. Vesnitsky A. I. Volny v sistemakh s dvizhushchimisya granitsami i nagruzkami [Waves in systems with moving boundaries and loads]. Moscow, Fizmatlit, 2001, 320 p. ISBN 5-9221-0172-2.

5. Hao Le Van. Modelirovaniye nestatsionarnykh termodiffuzionnykh kolebaniy balki Bernulli-Eylera [Modeling of non-stationary thermal diffusion oscillations of a Bernoulli-Euler beam] : spetsialnost 1.1.8: diss. ... kand. fiziko-matematicheskikh nauk. Moscow, Moskovskiy aviatsionnyy institut, 2025, 112 p.

6. Davydov S. A. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya uprugikh sred s uchotom teplomassoperenosa [Analysis of the stress-strain state of elastic media taking into account heat and mass transfer] : spetsialnost 01.02.04 : diss. ... kand. fiziko-matematicheskikh nauk. Moscow, Moskovskiy aviatsionnyy institut, 2020, 120 p.

7. Erofeev V. I., Kazhaev V. V., Semerikova N. P. Volny v sterzhnyakh. Dispersiya. Dissipatsiya. Nelineynost [Waves in rods. Dispersion. Dissipation. Nonlinearity]. Moscow, Fizmatlit, 2002, 208 p. ISBN 5-9221-0294-X.

8. Grinchenko V. T., Meleshko V. V. Garmonicheskkiye kolebaniya i volny v uprugikh telakh [Harmonic oscillations and waves in elastic bodies]. Kiev, Naukova dumka, 1981, 284 p.

9. Erofeev V. I., Kazhaev V. V., Lisenkova E. E., Semerikova N. P. Sravnitelnyy analiz dinamicheskogo povedeniya balok modeley Bernulli-Eylera, Releya i Timoshenko, lezhashchikh na uprugom osnovanii [Comparative analysis of the dynamic behavior of beams of the Bernoulli-Euler, Rayleigh and Timoshenko models lying on an elastic foundation]. Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya [Bulletin of science and Technical Development]. 2009, № 8 (24), P. 18–26.

10. Makarov V. P., Rukhadze A. A., Samokhin A. A. Ob elektromagnitnykh volnakh s otritsatelnoy gruppovoy skorostyu [On electromagnetic waves with negative group velocity]. Prikladnaya fizika [Applied Physics]. 2009, № 4, P.19–30.

11. Babichev A. P., Babushkina N. A., Bratkovsky A. M. [et al.]. Fizicheskiye velichiny: spravochnik [Physical quantities: a handbook]. pod red. Grigoryeva I. S., Meylikhova Ye. Z. Moscow, Energoatomizdat, 1991, 1232 p. ISBN 5-283-04013-5.

© В. И. Ерофеев, Н. И. Молодушная, Е. А. Никитина, 2026

Получено: 08.04.2026 г.



ПРИЛОЖЕНИЯ К СТАТЬЕ
В. И. ЕРОФЕЕВА, Н. И. МОЛОДУШНОЙ, Е. А. НИКИТИНОЙ
«ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗГИБНЫХ ВОЛН
В БАЛКЕ БЕРНУЛЛИ-ЭЙЛЕРА С УЧЕТОМ РЕЛАКСАЦИИ ТЕПЛОВЫХ
И ДИФФУЗИОННЫХ ПОТОКОВ»

Приложение А – безразмерные величины

$$b_1 = \frac{b_1^* T_0}{C_{1111}}, \alpha_1^1 = \frac{\alpha_1^*}{C_{1111}}, \tau_0^1 = \frac{C \tau_r}{l}, v^1 = \frac{v^*}{\rho c_0 T_0}, \aleph_1 = \frac{\aleph_1^*}{\rho c_0 C l}$$

$$\tau_1^1 = \frac{C \tau^1}{l}, D_1^1 = \frac{D_1^*}{C l}, \Lambda_{11}^1 = \frac{\Lambda_{11}^*}{C l}, M_1^1 = \frac{M_1^*}{T_0}.$$

$$v^{1*} = \rho R T_0 \frac{\ln[n_0^1 \gamma^1]}{m^1}, M_1^{1*} = n_0^1 D_1^{1*} \ln[n_0^1 \gamma^1],$$

$$\Lambda_{11}^{1*} = \frac{m^1 D_1^{1*} \alpha_1^* n_0^1}{\rho R T_0}$$

Здесь T_0 – начальная температура среды; b_1^* – температурный коэффициент, характеризующий деформации за счет нагрева; D_1^{1*} – коэффициент диффузии; ρ – плотность; c_0 – удельная теплоемкость; C – скорость волны растяжения-сжатия в упругой среде; l – длина балки; C_{1111} – компоненты тензора упругих постоянных; α_1^* – коэффициент, характеризующий объемное изменение среды за счет диффузии; τ_r и τ^1 – времена релаксации тепловых и диффузионных потоков; n_0^1 – начальная концентрация q -го вещества; γ^1 – коэффициент активности; \aleph_1^* – компонента тензора теплопроводности; m^1 – полярная масса q -го вещества; R – газовая постоянная.

Приложение Б – решение системы (3)

Для решения применяем метод Саррюса. Детерминант системы (3):

$$\begin{vmatrix} V_0 & \Theta_0 & H_0 \\ k^4 - a\omega^2 & -b_1 k^2 & -\alpha_1^1 k^2 \\ 0 & \aleph_1 k^2 - \tau_0^1 \omega^2 & -\tau_0^1 v^1 \omega^2 \\ \Lambda_{11}^1 k^4 & -M_1^1 k^2 & \tau_1^1 \omega^2 - D_1^1 k^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (\text{Б.1})$$

После преобразований:

$$\begin{aligned} & a\tau_0^1 \tau_1^1 \omega^6 + (-\tau_0^1 \tau_1^1 k^4 - a\tau_0^1 D_1^1 k^2 - a\aleph_1 \tau_1^1 k^2 + a\tau_0^1 v^1 M_1^1 k^2) \omega^4 + \\ & + \left(\tau_0^1 D_1^1 k^6 + \aleph_1 \tau_1^1 k^6 + a\aleph_1 D_1^1 k^4 + \Lambda_{11}^1 b_1 \tau_0^1 v^1 k^6 - \right. \\ & \left. - \Lambda_{11}^1 \alpha_1^1 \tau_0^1 k^6 - \tau_0^1 v^1 M_1^1 k^6 \right) \omega^2 + \\ & + (\Lambda_{11}^1 \alpha_1^1 \aleph_1 - \aleph_1 D_1^1) k^8 = 0 \end{aligned} \quad (\text{Б.2})$$

Приложение В – решение уравнения (5)

Для решения уравнения (5) применена формула Кордано:

$$\begin{aligned} p &= \left(-\frac{D_1^1}{a\tau_1^1} - \frac{\aleph_1}{a\tau_0^1} + \frac{v^1 M_1^1}{a\tau_1^1} - \frac{\Lambda_{11}^1 b_1 v^1}{3a\tau_1^1} + \frac{\Lambda_{11}^1 \alpha_1^1}{3a\tau_1^1} \right) k^6 - \frac{k^8}{3a} + \\ &+ \left(-\frac{D_1^{12}}{3\tau_1^{12}} - \frac{\aleph_1 D_1^1}{\tau_0^1 \tau_1^1} + \frac{2v^1 M_1^1 D_1^1}{3\tau_1^{12}} - \frac{\aleph_1^2}{3\tau_0^1 \tau_1^1} + \frac{2\aleph_1 v^1 M_1^1}{3\tau_0^1 \tau_1^1} - \frac{v^{12} M_1^{12}}{3\tau_1^{12}} \right) k^4 = \\ &= Ak^6 - \frac{k^8}{3a} + Bk^4 \\ q &= -\frac{2k^{12}}{27a^3} + \left(-\frac{D_1^1}{9a^2 \tau_1^1} - \frac{\aleph_1}{9a^2 \tau_0^1} - \frac{v^1 M_1^1}{9a^2 \tau_1^1} + \frac{\Lambda_{11}^1 b_1 v^1}{3a^2 \tau_1^1} - \frac{\Lambda_{11}^1 \alpha_1^1}{3a^2 \tau_1^1} \right) k^{10} + \\ &+ \left(\frac{D_1^1}{9a\tau_1^{12}} + \frac{4\aleph_1 D_1^1}{9a\tau_0^1 \tau_1^1} - \frac{v^1 D_1^1 M_1^1}{9a^2 \tau_1^{12}} + \frac{5\aleph_1^2}{27a\tau_0^{12}} - \right. \\ &\left. - \frac{2\aleph_1 v^1 M_1^1}{9a\tau_0^1 \tau_1^1} + \frac{v^{12} M_1^1}{9a\tau_1^{12}} - \frac{\Lambda_{11}^1 \aleph_1 b_1 v^1}{a\tau_0^1 \tau_1^1} + \frac{2\Lambda_{11}^1 \aleph_1 \alpha_1^1}{3a\tau_0^1 \tau_1^1} + \frac{\Lambda_{11}^1 b_1 v^{12} M_1^1}{a\tau_1^{12}} - \frac{\Lambda_{11}^1 \alpha_1^1 v^{12} M_1^1}{a\tau_1^{12}} \right) k^8 + \\ &+ \left(-\frac{2D_1^{13}}{27\tau_1^{13}} + \frac{\aleph_1 D_1^{12}}{9\tau_0^1 \tau_1^{12}} + \frac{\aleph_1^2 D_1^1}{9\tau_0^1 \tau_1^{12}} + \frac{\aleph_1 v^1 M_1^1 D_1^1}{9\tau_0^1 \tau_1^{12}} + \frac{2D_1^{12} v^1 M_1^1}{9\tau_1^{13}} - \right. \\ &\left. - \frac{2D_1^{12} v^{12} M_1^{12}}{9\tau_1^{13}} - \frac{\aleph_1^3}{\tau_0^1 \tau_1^1} + \frac{2\aleph_1^2 v^1 M_1^1}{\tau_0^1 \tau_1^1} - \frac{\aleph_1 v^{12} M_1^{12}}{\tau_1^{12}} + \frac{\aleph_1^2 v^1 M_1^1}{\tau_0^1 \tau_1^{12}} - \frac{2\aleph_1 v^{12} M_1^{12}}{\tau_0^1 \tau_1^{12}} + \frac{v^{13} M_1^{13}}{\tau_1^{13}} \right) k^6 = \\ &= -\frac{2k^{12}}{27a^3} + Jk^{10} + Wk^8 + Fk^6 \end{aligned} \quad (B.1)$$

$$\begin{aligned} Q &= \left(\frac{p}{3} \right)^3 + \left(\frac{q}{2} \right)^2 \\ Q &= k^{22} \left\{ \frac{1}{243a^4} A - \frac{1}{27a^3} J \right\} + k^{20} \left\{ \frac{1}{243a^4} B - \frac{1}{81a^2} A^2 + \frac{1}{4} J^2 - \frac{1}{54a^3} W \right\} + \\ &+ k^{18} \left\{ \frac{1}{27} A^3 + \frac{1}{2} \left(JW - \frac{2}{27a^3} F \right) \right\} + k^{16} \left\{ \frac{1}{27} A^2 B - \frac{1}{81a^2} B^2 + \frac{3}{4} JF \right\} + \\ &+ k^{14} \left\{ \frac{1}{27} AB^2 + \frac{1}{4} FW \right\} + k^{12} \left\{ \frac{1}{27} B^3 + \frac{1}{4} F^2 \right\} \end{aligned} \quad (B.2)$$



здесь:

$$\begin{aligned}
 A &= -\frac{D_1^1}{a\tau_1^1} - \frac{\aleph_1}{a\tau_0^1} + \frac{v^1 M_1^1}{a\tau_1^1} - \frac{\Lambda_{11}^1 b_1 v^1}{3a\tau_1^1} + \frac{\Lambda_{11}^1 \alpha_1^1}{3a\tau_1^1} \\
 B &= -\frac{D_1^{12}}{3\tau_1^{12}} - \frac{\aleph_1 D_1^1}{\tau_0^1 \tau_1^1} + \frac{2}{3} \frac{v^1 M_1^1 D_1^1}{\tau_1^{12}} - \frac{\aleph_1^2}{3\tau_0^1 \tau_1^1} + \frac{2}{3} \frac{\aleph_1 v^1 M_1^1}{\tau_0^1 \tau_1^1} - \frac{v^{12} M_1^{12}}{3\tau_1^{12}} \\
 J &= -\frac{D_1^1}{9a^2 \tau_1^1} - \frac{\aleph_1}{9a^2 \tau_0^1} - \frac{v^1 M_1^1}{9a^2 \tau_1^1} + \frac{\Lambda_{11}^1 b_1 v^1}{3a^2 \tau_1^1} - \frac{\Lambda_{11}^1 \alpha_1^1}{3a^2 \tau_1^1} \\
 W &= \frac{D_1^1}{9a\tau_1^{12}} + \frac{4\aleph_1 D_1^1}{9a\tau_0^1 \tau_1^1} - \frac{v^1 D_1^1 M_1^1}{9a^2 \tau_1^{12}} + \frac{5\aleph_1^2}{27a\tau_0^{12}} - \\
 &\quad - \frac{2\aleph_1 v^1 M_1^1}{9a\tau_0^1 \tau_1^1} + \frac{v^{12} M_1^1}{9a\tau_1^{12}} - \frac{\Lambda_{11}^1 \aleph_1 b_1 v^1}{a\tau_0^1 \tau_1^1} + \frac{2\Lambda_{11}^1 \aleph_1 \alpha_1^1}{3a\tau_0^1 \tau_1^1} + \frac{\Lambda_{11}^1 b_1 v^{12} M_1^1}{a\tau_1^{12}} - \frac{\Lambda_{11}^1 \alpha_1^1 v^{12} M_1^1}{a\tau_1^{12}} \\
 F &= -\frac{2D_1^{13}}{27\tau_1^{13}} + \frac{\aleph_1 D_1^{12}}{9\tau_0^1 \tau_1^{12}} + \frac{\aleph_1^2 D_1^1}{9\tau_0^1 \tau_1^{12}} + \frac{\aleph_1 v^1 M_1^1 D_1^1}{9\tau_0^1 \tau_1^{12}} + \frac{2D_1^{12} v^1 M_1^1}{9\tau_1^{13}} - \\
 &\quad - \frac{2D_1^1 v^{12} M_1^{12}}{9\tau_1^{13}} - \frac{\aleph_1^3}{\tau_0^{12} \tau_1^1} + \frac{2\aleph_1^2 v^1 M_1^1}{\tau_0^{12} \tau_1^1} - \frac{\aleph_1 v^{12} M_1^{12}}{\tau_1^{12}} + \\
 &\quad + \frac{\aleph_1^2 v^1 M_1^1}{\tau_0^1 \tau_1^{12}} - \frac{2\aleph_1 v^{12} M_1^{12}}{\tau_0^1 \tau_1^{12}} + \frac{v^{13} M_1^{13}}{\tau_1^{13}}
 \end{aligned} \tag{B.3}$$

Таким образом, t :

$$\begin{aligned}
 t_1 &= \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} - \frac{\frac{k^4}{a} - \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} - \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} + \frac{v^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1}}{3} \\
 t_2 &= -\frac{\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}}{2} + i \frac{\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}}{2} \sqrt{3} - \\
 &\quad - \frac{\frac{k^4}{a} - \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} - \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} + \frac{v^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1}}{3} \\
 t_3 &= -\frac{\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}}{2} - i \frac{\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}}{2} \sqrt{3} - \\
 &\quad - \frac{\frac{k^4}{a} - \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} - \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} + \frac{v^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1}}{3}
 \end{aligned} \tag{B.4}$$



Приложение Г – Комплексная частота (6)

Действительная и мнимая части частоты системы (6) представлены в виде:

$$\left. \begin{aligned} \omega_2 = & \sqrt[4]{\frac{\left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1}\right)^2}{9} + \frac{\left(-\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}\right)\left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1}\right)}{3}} * \\ & * \cos \left(\frac{\arctg \left(\frac{3\sqrt{3} \left(\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right)}{3 \left(-\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right) + 2 \left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1} \right)} \right)}{2} \right) \\ \omega_2 = & \sqrt[4]{\frac{\left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1}\right)^2}{9} + \frac{\left(-\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}\right)\left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1}\right)}{3}} * \\ & * \sin \left(\frac{\arctg \left(\frac{3\sqrt{3} \left(\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right)}{3 \left(-\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right) + 2 \left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1} \right)} \right)}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (\Gamma.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \omega_3 = & \sqrt[4]{\frac{\left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1}\right)^2}{9} + \frac{\left(-\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}\right)\left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1}\right)}{3}} * \\ & * \cos \left(\frac{\arctg \left(\frac{3\sqrt{3} \left(\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right)}{3 \left(-\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right) + 2 \left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1} \right)} \right)}{2} \right) \\ \omega_3 = & - \sqrt[4]{\frac{\left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1}\right)^2}{9} + \frac{\left(-\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}\right)\left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1}\right)}{3}} * \\ & * \sin \left(\frac{\arctg \left(\frac{3\sqrt{3} \left(\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right)}{3 \left(-\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right) + 2 \left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1} \right)} \right)}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (\Gamma.2)$$



Здесь приняты обозначения:

$$\begin{aligned} P &= \left\{ \frac{1}{243a^4} A - \frac{1}{27a^3} J \right\}; G = \left\{ \frac{1}{243a^4} B - \frac{1}{81a^2} A^2 + \frac{1}{4} J^2 - \frac{1}{54a^3} W \right\}; \\ E &= \left\{ \frac{1}{27} A^3 + \frac{1}{2} \left(JW - \frac{2}{27a^3} F \right) \right\}; Z = \left\{ \frac{1}{27} A^2 B - \frac{1}{81a^2} B^2 + \frac{3}{4} JF \right\}; \\ R &= \left\{ \frac{1}{27} AB^2 + \frac{1}{4} FW \right\}; C = \left\{ \frac{1}{27} B^3 + \frac{1}{4} F^2 \right\} \end{aligned} \quad (\Gamma.3)$$

Приложение Д – фазовые и групповые скорости

Фазовые скорости имеют вид:

$$v_{\phi}^1 = \sqrt[3]{-\frac{2k^6}{27a^3} + Jk^4 + Wk^2 + F} + \sqrt{Pk^{10} + Gk^8 + Ek^6 + Zk^4 + Rk^2 + C} + \sqrt[3]{-\frac{2k^6}{27a^3} + Jk^4 + Wk^2 + F} - \sqrt{Pk^{10} + Gk^8 + Ek^6 + Zk^4 + Rk^2 + C} - \frac{k^2}{a} - \frac{D_1^1}{\tau_1^1} - \frac{\aleph_1^1}{\tau_0^1} + \frac{v^1 M_1^1}{\tau_1^1} \quad (\text{Д.1})$$

$$v_{\phi}^{2,3} = \frac{1}{k^4} \sqrt[4]{\frac{\left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1^1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{v^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1} \right)^2}{9} + \frac{\left(-\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right) \left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1^1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{v^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1} \right)}{3}} * \left[\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{\left(-\frac{q}{2} + \sqrt{Q} \right) \left(-\frac{q}{2} - \sqrt{Q} \right)} \right] * \cos \left[\frac{\arctg \left(\frac{3\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}}{3 \left(-\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right) + 2 \left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1^1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{v^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1} \right)} \right)}{2} \right] \quad (\text{Д.2})$$

Групповые скорости имеют вид:

 $v'_{\varphi} =$

$$\begin{aligned}
& \sqrt[3]{\frac{-\frac{2k^{12}}{27a^3} + \frac{Jk^{10} + Wk^8 + Fk^6}{2}}{2} + \sqrt{Pk^{22} + Gk^{20} + Qk^{18} + Zk^{16} + Rk^{14} + Ck^{12}}} + \\
& \sqrt[3]{\frac{-\frac{2k^{12}}{27a^3} + \frac{Jk^{10} + Wk^8 + Fk^6}{2}}{2} - \sqrt{Pk^{22} + Gk^{20} + Qk^{18} + Zk^{16} + Rk^{14} + Ck^{12}}} - \\
& \left[\frac{-\frac{k^4}{a} - \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} - \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} + \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1}}{3} \right] \cdot \\
& \left\{ 4k^3 + 2 \left(\frac{D_1^1}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1}{\tau_1^1} \right) k + \frac{k^{11} (11Pk^{10} + 10Gk^8 + 9Qk^6 + 8Zk^4 + 7Rk^2 + 6C) + \left(\frac{12}{27a^3} k^{11} - 5Jk^9 - 4Wk^7 - 3Fk^5 \right) \sqrt{Pk^{22} + Gk^{20} + Qk^{18} + Zk^{16} + Rk^{14} + Ck^{12}}}{\sqrt{Pk^{22} + Gk^{20} + Qk^{18} + Zk^{16} + Rk^{14} + Ck^{12}}} \sqrt[3]{\frac{-\frac{2k^{12}}{27a^3} + \frac{Jk^{10} + Wk^8 + Fk^6}{2}}{2} + \sqrt{Pk^{22} + Gk^{20} + Qk^{18} + Zk^{16} + Rk^{14} + Ck^{12}}} + \right. \\
& \left. - k^{11} (11Pk^{10} + 10Gk^8 + 9Qk^6 + 8Zk^4 + 7Rk^2 + 6C) + \left(\frac{12}{27a^3} k^{11} - 5Jk^9 - 4Wk^7 - 3Fk^5 \right) \sqrt{Pk^{22} + Gk^{20} + Qk^{18} + Zk^{16} + Rk^{14} + Ck^{12}} \right. \\
& \left. + \frac{\sqrt{Pk^{22} + Gk^{20} + Qk^{18} + Zk^{16} + Rk^{14} + Ck^{12}}}{\sqrt[3]{\frac{-\frac{2k^{12}}{27a^3} + \frac{Jk^{10} + Wk^8 + Fk^6}{2}}{2} - \sqrt{Pk^{22} + Gk^{20} + Qk^{18} + Zk^{16} + Rk^{14} + Ck^{12}}}} \right\} \quad (Д.3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& v_{\varphi}^{2,3} = \frac{1}{4} \left[\frac{1}{9} U^2 - \frac{1}{3} \left[U \left(\sqrt{\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} + \sqrt{\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right) + \left(\frac{q}{2} + \sqrt{Q} \right)^{\frac{3}{2}} + \left(\frac{q}{2} - \sqrt{Q} \right)^{\frac{3}{2}} - \sqrt{\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} \left(-\frac{q}{2} - \sqrt{Q} \right) \right] \right]^{\frac{3}{4}} \cdot \\
& \cdot \left[\frac{2}{9} S(k^4 + k^2) - \frac{1}{3} \left[S \sqrt{\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} + \frac{U \left(\frac{N}{2\sqrt{Q}} + n \right)}{3 \sqrt{\left(\frac{q}{2} + \sqrt{Q} \right)^2}} + S \sqrt{\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} + \frac{U \left(-\frac{N}{2\sqrt{Q}} + n \right)}{3 \sqrt{\left(\frac{q}{2} - \sqrt{Q} \right)^2}} + \frac{\frac{N}{\sqrt{Q}} + 2n}{3 \sqrt{\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}} + \frac{-\frac{N}{\sqrt{Q}} + 2n}{3 \sqrt{\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}} \left(\frac{\left(-\frac{N}{2\sqrt{Q}} + n \right) \sqrt{\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}}{3 \sqrt{\left(\frac{q}{2} - \sqrt{Q} \right)^2}} + \frac{\left(\frac{N}{2\sqrt{Q}} + n \right) \sqrt{\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}}{3 \sqrt{\left(\frac{q}{2} + \sqrt{Q} \right)^2}} \right) \right] \right] \cdot \\
& \cdot \cos \left[\frac{\arctg \left(\frac{3\sqrt{3} \left(\sqrt{\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt{\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right)}{3 \left(-\sqrt{\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt{\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right) + 2 \left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1} \right)} \right)}{2} \right] \cdot \left[\frac{1}{9} U^2 - \frac{1}{3} \left[U \left(\sqrt{\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} + \sqrt{\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right) + \left(\frac{q}{2} + \sqrt{Q} \right)^{\frac{3}{2}} + \left(\frac{q}{2} - \sqrt{Q} \right)^{\frac{3}{2}} - \sqrt{\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} \left(-\frac{q}{2} - \sqrt{Q} \right) \right] \right]^{\frac{3}{4}} \cdot \\
& \cdot \sin \left[\frac{\arctg \left(\frac{3\sqrt{3} \left(\sqrt{\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt{\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right)}{3 \left(-\sqrt{\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt{\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right) + 2 \left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1} \right)} \right)}{2} \right] \cdot \left[\frac{1}{2+2} \left(\frac{3\sqrt{3} \left(\sqrt{\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt{\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right)}{3 \left(-\sqrt{\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt{\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right) + 2 \left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1} \right)} \right) \right] \cdot \\
& \cdot \frac{\left[\sqrt{3} \left(3 \left(-\sqrt{\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt{\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right) + 2 \left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1} \right) \right) \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}} \left[\frac{N}{2\sqrt{Q}} + n \right] + \frac{1}{\sqrt{\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}} \left[\frac{N}{2\sqrt{Q}} - n \right] \right) - 3\sqrt{3} \left(\sqrt{\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt{\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right) \left(2S + \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}} \left[\frac{N}{2\sqrt{Q}} + n \right] + \frac{1}{\sqrt{\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}} \left[\frac{N}{2\sqrt{Q}} - n \right] \right) \right) \right]}{\left(3 \left(-\sqrt{\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt{\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right) + 2 \left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1} \right) \right)^2} \right] \quad (Д.4)
\end{aligned}$$

Здесь приняты обозначения:

$$\begin{aligned}
U &= \left(\frac{k^4}{a} + \left(\frac{D_1^1}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1}{\tau_1^1} \right) k^2 \right); S = \left(4 \frac{k^3}{a} + 2 \left(\frac{D_1^1}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1}{\tau_1^1} \right) k \right) \\
N &= 22Pk^{21} + 20Gk^{19} + 18Qk^{17} + 16Zk^{15} + 14Rk^{13} + 12Ck^{11}; \\
n &= \frac{4}{9} k^{11} - 5Jk^9 - 4Wk^7 - 3Fk^5
\end{aligned} \quad (Д.5)$$

$$v_{\varphi}^{2,3} = \frac{1}{4} f^{\frac{3}{4}} f' \cos \left(\frac{\arctg(\Phi)}{2} \right) - f^{\frac{1}{4}} \sin \left(\frac{\arctg(\Phi)}{2} \right) \Psi \quad (Д.6)$$



$$f = \left\{ \frac{1}{9} U^2 - \frac{1}{3} \left[U \left(\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right) + \left(-\frac{q}{2} + \sqrt{Q} \right)^{\frac{2}{3}} + \left(-\frac{q}{2} - \sqrt{Q} \right)^{\frac{2}{3}} - \sqrt[3]{\left(-\frac{q}{2} + \sqrt{Q} \right) \left(-\frac{q}{2} - \sqrt{Q} \right)} \right] \right\} \quad (\text{Д.7})$$

$$f' = \left\{ \frac{2}{9} S(k^4 + k^2) - \frac{1}{3} \left[S \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} + \frac{U \left(\frac{N}{2\sqrt{Q}} + n \right)}{3 \sqrt[3]{\left(-\frac{q}{2} + \sqrt{Q} \right)^2}} + S \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} + \frac{U \left(-\frac{N}{2\sqrt{Q}} + n \right)}{3 \sqrt[3]{\left(-\frac{q}{2} - \sqrt{Q} \right)^2}} + \frac{\frac{N}{\sqrt{Q}} + 2n}{3 \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}} + \frac{-\frac{N}{\sqrt{Q}} + 2n}{3 \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}} - \left\langle \frac{\left(-\frac{N}{2\sqrt{Q}} + n \right) \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}}{3 \sqrt[3]{\left(-\frac{q}{2} - \sqrt{Q} \right)^2}} + \frac{\left(\frac{N}{2\sqrt{Q}} + n \right) \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}}{3 \sqrt[3]{\left(-\frac{q}{2} + \sqrt{Q} \right)^2}} \right\rangle \right] \right\} \quad (\text{Д.8})$$

$$\Phi = \frac{3\sqrt{3} \left(\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right)}{3 \left(-\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right) + 2 \left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1} \right)} \quad (\text{Д.9})$$

$$\Psi = \left(\frac{1}{2 + 2(\Phi)} \right) \left\{ \frac{\Psi' \Psi''}{\Psi^*} \right\} \quad (\text{Д.10})$$

$$\Psi' = \sqrt{3} \left(3 \left(-\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right) + 2 \left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1} \right) \right)$$

$$\Psi'' = \left(\frac{1}{\sqrt[3]{\left(-\frac{q}{2} + \sqrt{Q} \right)^2}} \left[\frac{N}{2\sqrt{Q}} + n \right] + \frac{1}{\sqrt[3]{\left(-\frac{q}{2} - \sqrt{Q} \right)^2}} \left[\frac{N}{2\sqrt{Q}} - n \right] \right) -$$

$$-3\sqrt{3} \left(\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right) *$$

$$* \left(2S + \left(\frac{1}{\sqrt[3]{\left(-\frac{q}{2} + \sqrt{Q} \right)^2}} \left[\frac{N}{2\sqrt{Q}} + n \right] + \frac{1}{\sqrt[3]{\left(-\frac{q}{2} - \sqrt{Q} \right)^2}} \left[\frac{N}{2\sqrt{Q}} - n \right] \right) \right)$$

$$\Psi^* = \left(3 \left(-\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} - \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \right) + 2 \left(\frac{k^4}{a} + \frac{D_1^1 k^2}{\tau_1^1} + \frac{\aleph_1 k^2}{\tau_0^1} - \frac{\nu^1 M_1^1 k^2}{\tau_1^1} \right) \right)^2 \quad (\text{Д.12})$$

УДК 628.162

А. Л. ВАСИЛЬЕВ¹, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой водоснабжения, водоотведения, инженерной экологии и химии; **А. С. БАЛОБАНОВ^{1,2}**, аспирант, руководитель проектов

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ
ПРОЦЕССОВ КОАГУЛИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД В
СИСТЕМАХ ВОДОПОДГОТОВКИ**

¹ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-54-87; эл. почта: k_viv@nngasu.ru

²ООО «НПЦ ПромВодОчистка».

Россия, г. Н. Новгород, ул. Яблонева, д. 20, литера КК1, П1.

Тел.: (831) 262-16-01; эл. почта: info@prom-water.ru

Ключевые слова: водоподготовка, качество воды, ультразвук, коагуляция, модернизация.

В статье изложен анализ использования ультразвуковых излучателей в системах водоподготовки.

Основу воздействия ультразвука составляет явление кавитации. При распространении акустических волн низкой частоты (20–40 кГц) в жидкости возникают зоны переменного давления. В фазах разрежения образуются и растут микропузырьки газа или пара, которые затем в фазах сжатия подвергаются быстрому схлопыванию (имплозии). Этот процесс сопровождается генерацией экстремальных локальных условий: температура достигает нескольких тысяч градусов, давление – сотен атмосфер. Порождаемые при этом ударные волны и интенсивные гидродинамические микропотоки оказывают комплексное влияние на водную систему [1].

Прежде всего, происходит механическая дезинтеграция – разрушение крупных агрегатов загрязняющих веществ, хлопьев и коллоидных комплексов. Это приводит к высвобождению мелких частиц и значительному увеличению площади поверхности контакта для последующего взаимодействия с коагулянтами. Параллельно возникающие акустические течения обеспечивают эффект интенсивного микроперемешивания, интенсифицируя массообмен и распределение реагентов в объеме.

Механическая дезинтеграция частиц в воде под действием ультразвука представляет собой сложный процесс, обусловленный синергетическим воздействием ряда высокоэнергетических физических явлений, инициируемых ультразвуковой кавитацией [2].

В момент имплозии (схлопывания) микропузырьков генерируются мощные ударные волны, создающие в жидкости зоны резкого перепада давления. Эти волны оказывают на частицы и хлопья мгновенное механическое давление, превышающее прочность внутренних связей в агрегатах, что приводит к их



раскалыванию. Одновременно, в непосредственной близости от поверхностей частиц, схлопывание пузырьков становится асимметричным, порождая направленные гидродинамические микроструи со скоростью в сотни метров в секунду. Эти струи действуют как микроскопические гидравлические тараны, вызывая локальную эрозию и буквально «сбивая» фрагменты с более крупных образований.

Параллельно энергия ультразвука возбуждает в объеме жидкости интенсивные акустические течения и турбулентные микропотоки. Находясь в этих потоках, частицы испытывают значительные сдвиговые (тангенциальные) усилия, которые растягивают и разрывают рыхлые флоккулы, особенно те, что образованы полимерными мостиками или гидроксидами металлов. Дополнительным фактором является резонансное колебание самих частиц в звуковом поле, приводящее к циклическим деформациям и последующему усталостному разрушению их структуры при длительном воздействии. Эффект усиливается за счет интенсификации взаимных соударений частиц, которые в ультразвуковом поле приобретают высокую кинетическую энергию, приводящую к дробящим, а не агломерирующим столкновениям [3].

Наконец, сопутствующий кавитации локальный мгновенный нагрев создает в микрообъемах значительные тепловые напряжения из-за разного теплового расширения компонентов сложных частиц, что способствует их растрескиванию и расслоению.

Таким образом, механическая дезинтеграция – это не простой разлом, а результат комплексного воздействия, при котором ударные волны, микроструи, сдвиговые силы, резонансные колебания и соударения превращают объем обрабатываемой воды в реактор для эффективного диспергирования и разрушения агрегированных загрязнений.

С кавитацией связаны и важные физико-химические эффекты. Ударные волны способны дестабилизировать двойной электрический слой, окружающий коллоидные частицы, снижая их электростатический потенциал и предрасполагая к агломерации. В некоторых условиях при схлопывании пузырьков возможен радиолитиз воды с образованием высокореакционных гидроксильных радикалов (ОН), способствующих окислению растворенной органики. Кроме того, ультразвук может вызывать солиubilизацию органических загрязнений, переводя их из связанного, трудноудаляемого состояния в более доступную для коагуляции или окисления форму.

Совокупность описанных выше механизмов создает мощный синергетический эффект применительно к коагуляции. Предварительная или совмещенная ультразвуковая обработка исходной воды выполняет роль технологического активатора. Дезинтеграция сложных органических комплексов (например, гуминовых веществ) и дестабилизация коллоидной системы позволяют существенно снизить оптимальные дозы коагулянтов, так как уменьшается «конкуренция» за активные центры реагента и повышается эффективность его использования.

Интеграция ультразвука в процесс коагуляции реализуется как технология физико-химической активации, где ультразвуковое воздействие не заменяет, а синергетически усиливает традиционную реагентную обработку, оптимизируя ее на всех ключевых стадиях. Практическое воплощение этой интеграции может



быть выражено через последовательное или совмещенное применение ультразвука, которое коренным образом меняет ход процесса.

На этапе предварительной подготовки воды ультразвуковая обработка выполняет роль дезинтегратора и модификатора загрязнений. Мощные кавитационные микроструи и ударные волны эффективно дробят крупные органические агрегаты (например, гуминовые комплексы), коллоидные скопления и взвешенные частицы, увеличивая их удельную поверхность. Параллельно за счет физико-химических эффектов происходит частичная дестабилизация двойного электрического слоя частиц и солубилизация трудноудаляемых органических веществ. Это создает принципиально иную, более подготовленную среду для введения коагулянта: снижается «конкурентная нагрузка» на реагент, а его активные центры получают доступ к большему количеству более мелких и реакционноспособных мишеней, что позволяет существенно снизить оптимальную дозу коагулянта – на 20–40 % в зависимости от состава воды.

На стадии собственно коагуляции и хлопьеобразования интеграция может быть как последовательной, так и одновременной. При совместном воздействии акустические течения и микроперемешивание, индуцируемые ультразвуком, обеспечивают мгновенное и гомогенное распределение коагулянта в объеме, исключая локальные пере- или недодозы. Это ускоряет стадии нейтрализации заряда и образования первичных микророзродышей. Далее, в фазе агрегации, ультразвук играет парадоксальную, но управляемую роль: оптимально дозированное воздействие интенсифицирует столкновения частиц за счет гидродинамических сил, способствуя формированию хлопьев. При этом, благодаря предварительной дестабилизации, образуются более плотные и компактные хлопьевидные структуры с улучшенными седиментационными характеристиками. Важно отметить, что параметры ультразвука (мощность, время) на этой стадии должны быть тщательно подобраны, чтобы избежать обратного эффекта – разрушения уже сформировавшихся хлопьев.

Таким образом, интеграция ультразвука выражается в его многоточечном встраивании в технологическую цепочку: от предобработки сырой воды для снижения реагентопотребления, через интенсификацию смешения и дозирования, до управления морфологией и скоростью осаждения хлопьев. Технически это реализуется установкой проточных ультразвуковых реакторов-активаторов на линии подачи воды перед камерой хлопьеобразования или непосредственно в ней. В результате процесс коагуляции становится не только более экономичным, но и более управляемым, быстрым и эффективным, обеспечивая стабильно высокое качество осветления даже при колебаниях состава исходной воды.

Интенсифицированное микроперемешивание способствует более быстрому и равномерному распределению коагулянта, что ускоряет стадии нейтрализации заряда и образования микродисперсных зародышей хлопьев [4]. Последующая стадия хлопьеобразования (флокуляция) также протекает эффективнее: кавитационные микропотоки увеличивают частоту и энергию столкновений частиц, что ведет к формированию более плотных, быстрооседающих хлопьев. Это, в свою очередь, сокращает время отстаивания и улучшает характеристики осветленной воды [5].

Практические аспекты, примеры и ограничения использования ультразвука в процессах водоподготовки раскрывают его потенциал как технологического инструмента, одновременно обозначая границы его экономической и технической



целесообразности [6]. С практической точки зрения ключевыми параметрами, требующими точной настройки, являются частота, удельная энергия ($\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$), время экспозиции и конструкция реактора. Как правило, для целей интенсификации коагуляции достаточно низкочастотного диапазона (20–40 кГц) и кратковременного воздействия (от 10 секунд до 2–3 минут), что позволяет встраивать ультразвуковые модули непосредственно в потоковые линии смешения или перед камерами хлопьеобразования. Технологически это реализуется с помощью проточных реакторов, оснащенных пьезоэлектрическими или магнитострикционными излучателями (сонотродами), часто объединенными в каскад для обработки больших объемов. Важнейшим аспектом является энергоэффективность: удельные энергозатраты должны быть тщательно соотнесены с достигаемым эффектом снижения дозы коагулянта и улучшения качества очистки.

Конкретные примеры успешного применения, хотя и более распространенные в области обработки осадков, демонстрируют принципиальную работоспособность метода. Например, в ряде пилотных проектов на станциях подготовки питьевой воды предварительная ультразвуковая обработка воды с высокой цветностью и мутностью позволила снизить дозу коагулянта (например, сульфата алюминия) на 25–30 % при одновременном сокращении времени отстаивания на 15–20 % [7]. Совмещение ультразвука с введением флокулянта привело к формированию более крупных и плотных хлопьев, что улучшило показатели осаждения. Эти примеры подтверждают, что ультразвук может служить эффективным инструментом для оптимизации работы существующих очистных сооружений без их кардинальной реконструкции.

Однако внедрению метода препятствуют существенные ограничения. На первом месте стоят высокие капитальные и эксплуатационные затраты, связанные с приобретением мощных генераторов, износостойких излучателей и необходимостью значительного расхода электроэнергии, что делает экономику проекта чувствительной к тарифам [8]. Вторым серьезным барьером является сложность масштабирования и управления: эффективность сильно зависит от изменчивого состава воды – колебания pH , минерализации, концентрации и типа загрязнений требуют адаптации режимов, что усложняет автоматизацию [9]. Также существуют технологические риски: передозировка ультразвуковой энергии или неправильно выбранная частота могут привести к чрезмерной дисперсии загрязнений, что затруднит их последующую коагуляцию и ухудшит осаждаемость. Кроме того, долгосрочная надежность оборудования в условиях постоянной работы с абразивными взвесями и проблема кавитационной эрозии самих излучателей требуют дополнительных решений [8, 10].

Таким образом, практическое применение ультразвука в водоподготовке – это поиск баланса между его неоспоримым активирующим потенциалом и экономико-инженерными ограничениями. Его использование наиболее оправдано в качестве точечного решения на конкретных проблемных участках (например, при сезонном ухудшении качества сырой воды) или в комбинации с другими передовыми методами, где синергия может компенсировать высокие удельные затраты. Для широкого промышленного внедрения необходимы дальнейшие разработки в области энергоэффективных излучателей, интеллектуальных систем адаптивного контроля и накопление большего массива данных долгосрочной эксплуатации на реальных объектах.

Экспериментальные исследования, проведенные с использованием ультразвука частотой 22 кГц, подтвердили значимое улучшение ключевых показателей коагуляции при обработке поверхностных вод. Практические результаты демонстрируют, что ультразвуковое воздействие интенсивностью 3–10 Вт/см² в течение 1–5 минут в комбинированных схемах с коагулянтами позволяет сократить дозу реагентов на 50 % без ухудшения качества очистки. Наибольший синергетический эффект наблюдается при использовании с сульфатом алюминия: эффективность удаления мутности возрастает на 25–35 %, при этом остаточная мутность снижается с 17, мг/л до 2,1 мг/л против 2,8 мг/л при полной дозе коагулянта без ультразвука, а с хлоридом железа – повышает удаление мутности более чем на 30 % (рис. 1).



Рис. 1. Эффективность коагуляции с использованием ультразвука

Технологически значимым результатом является ускорение процесса: время начала флокуляции сокращается на 2–4 минуты, а общая продолжительность осаждения уменьшается на 20 минут. Это позволяет оптимизировать гидравлический режим очистных сооружений. Кроме того, формируются более плотные и крупные хлопья (до 2,25 мм), что улучшает их седиментационные свойства (рис. 2).

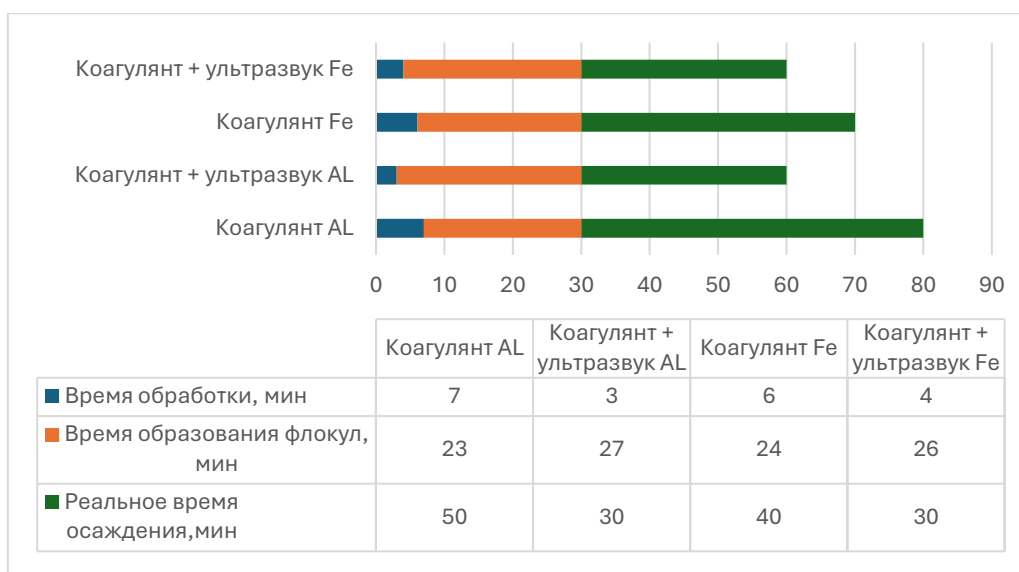


Рис. 2. Влияние ультразвукового воздействия на процесс коагулирования

Важным практическим аспектом является модификация структуры осадка: при совместном использовании ультразвука и сульфата алюминия происходит разделение фаз шлама с образованием зон свободной воды и компактных агрегатов твердой фазы. Это облегчает последующее обезвоживание осадка и сокращает объемы его утилизации (рис. 3).

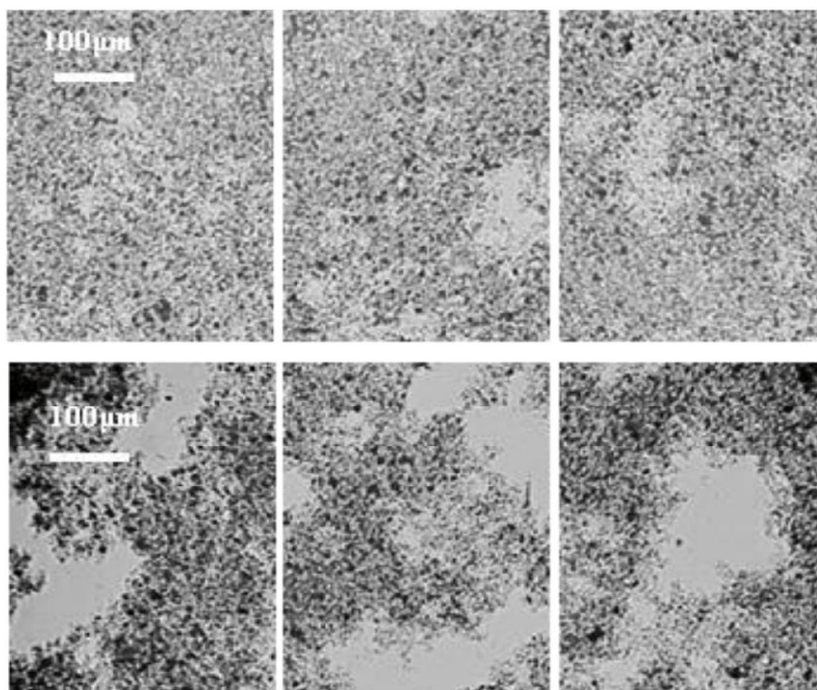


Рис. 3. Структура осадка после коагуляции сульфатом алюминия без использования ультразвука (первый ряд изображений) и с использованием ультразвука (второй ряд изображений)



В качестве основного метода использовался стандартный лабораторный тест на коагуляцию с алюминием в качестве коагулянта. Ключевым элементом была предварительная ультразвуковая обработка образцов перед добавлением коагулянта. Для оценки эффективности использовались два взаимодополняющих метода: измерение оптической плотности суспензии при длине волны 560 нм, которая имела линейную корреляцию с концентрацией клеток, и прямой микроскопический подсчет клеток. Дополнительно фиксировался показатель мутности обработанной воды.

Выводы об эффективности ультразвука для удаления мутности:

1. Высокая эффективность кратковременного воздействия: наиболее значимый вывод – для существенного улучшения последующей коагуляции достаточно крайне малого времени ультразвуковой обработки – всего 1–5 секунд. Оптимальная мощность в условиях эксперимента составила 48 Вт при частоте 22 кГц. Это указывает на то, что основной механизм – не длительное разрушение, а мгновенная дестабилизация загрязнений и потеря плавучести, что приводит к быстрому осаждению и облегчает их захват коагулянтном.

2. Синергизм с коагуляцией и снижение реагентной нагрузки: Ультразвуковая предобработка показала синергетический эффект с коагуляцией. При низких дозах коагулянта (0,4–0,8 мг/л) эффективность удаления возрастала более чем на 20 %. Для достижения целевого уровня удаления в 90 % доза коагулянта сокращалась на две трети (с 1,8 мг/л до 0,6 мг/л). Это прямое подтверждение реагентосберегающего потенциала ультразвука, что полностью согласуется с выводами из предыдущих материалов по коагуляции поверхностных вод.

3. Прямое улучшение показателя мутности: Исследование напрямую продемонстрировало, что ультразвуковая обработка значительно повышает эффективность снижения мутности в процессе коагуляции. Тренд был аналогичен удалению водорослей: наибольший прирост эффективности наблюдался при низких дозах коагулянта. Например, при дозе коагулянта 2 мг/л удаление мутности увеличилось с 42 % до 85 %.

4. Оптимальные параметры и ограничения. Определены ключевые оптимальные параметры: время 1–5 с, мощность ~ 48 Вт, (оптимальный для гидролиза солей алюминия). Частота в исследованном диапазоне (22–1320 кГц) не оказывала существенного влияния на результат. Критическим ограничением является недопустимость длительной обработки, так как это приводит к полному разрушению флоккул. Образующиеся мелкие фрагменты плохо осаждаются и могут ухудшать качество очищенной воды, что также коррелирует с выводами по обработке осадков, где чрезмерная интенсификация ультразвука ухудшала обезвоживание.

Ультразвук действует как многофакторный активатор, одновременно разрушая сложные агрегаты, усиливая массоперенос, модифицируя поверхность частиц и интенсифицируя химические реакции. Это позволяет оптимизировать традиционные методы водоподготовки (коагуляцию, флокуляцию, окисление) при снижении реагентной нагрузки и времени обработки.

Эффективность зависит от параметров УЗ (частота, мощность, время экспозиции), состава воды и конструктивных особенностей реактора. Высокие энергозатраты требуют тщательного расчета экономической целесообразности.

Ультразвуковая обработка, особенно в формате кратковременного предварительного воздействия (сонации), является высокоэффективным методом



интенсификации коагуляции для удаления мутности из поверхностных вод. Ее применение позволяет достичь глубокой очистки при значительном снижении доз реагентов, что соответствует принципам экономической эффективности и экологической безопасности. Ключом к успешному внедрению является строгое соблюдение оптимальных, научно обоснованных параметров обработки, исключающих разрушительное воздействие на загрязняющие частицы.

Ультразвуковая обработка представляет собой многофункциональный физический метод, способный существенно интенсифицировать процесс коагуляции поверхностных вод. Действуя через комплекс кавитационных, механических и физико-химических механизмов, ультразвук позволяет оптимизировать традиционную технологию, двигаясь в направлении «зеленой химии» за счет снижения реагентной нагрузки. Для успешной реализации этого потенциала необходимы дальнейшие прикладные исследования, направленные на разработку энергоэффективных аппаратных решений и создание адаптивных систем управления ультразвуковым воздействием в реальном времени в зависимости от качества исходной воды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Эффекты мощного ультразвукового воздействия на структуру и свойства наноматериалов : учебное пособие / О. Л. Хасанов, Э. С. Двилис, В. В. Полисадова, А. П. Зыкова. – Томск : ТПУ, 2009. – 148 с.
2. Маргулис, М. А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция / М. А. Маргулис. – Москва : Химия, 1986. – 285 с.
3. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В. Н. Хмелев, А. Н. Сливин, Р. В. Барсуков [и др.]. – Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203 с. – ISBN 978-5-9257-0187-4.
4. Мюллер, Г. В. Теория коагуляции полидисперсных систем / Г. В. Мюллер // Коагуляция коллоидов / под редакцией А. И. Рабиновича, П. С. Васильева. – Москва ; Ленинград : ОНТИ, 1936. – С. 7–40.
5. Кавитационная обработка воды. Свойства воды и эффективность обработки / Ю. М. Аверина, Н. А. Моисеева, Д. А. Шувалов [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. – 2018. – Т. 32, № 14 (210). – С. 17–19.
6. Викулина, В. Б. Очистка воды коагуляцией под действием ультразвукового поля / В. Б. Викулина, П. Д. Викулин // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 10. – С. 116–119.
7. Васильев, А. Л. Опыт применения ультразвуковых колебаний в технологии водоподготовки / А. Л. Васильев, Е. В. Воробьева // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии : Сборник статей 79-ой всероссийской научно-технической конференции, Самара, 18–22 апреля 2022 года / под редакцией М. В. Шувалова, А. А. Пищулева, А. К. Стрелкова. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2022. – С. 538–544.
8. Хмелев, В. Н. Выявление причин снижения эффективности применения ультразвуковых аппаратов / В. Н. Хмелев, С. В. Левин, С. С. Хмелев [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. – 2014. – № 1 (5). – С. 48–50.
9. Applications of Ultrasonic Emulsification. In: Ultrasonic Production of Nano-emulsions for Bioactive Delivery in Drug and Food Applications / T.S.H. Leong, S. Manickam, G.J.O. Martin, W. Li, M. Ashokkumar. – Springer : Briefs in Molecular Science, 2018. – DOI 10.1007/978-3-319-73491-0_1.



10. Ultrasonic nano-emulsification - A review / M. Seyed, M.-G. Mohsen, G.-G. Roghayeh, M. Massoud, S. Pedram Safarpoura, Z. Majid // Ultrasonics - Sonochemistry. – 2019. – 52. – P. 88–105.

VASILEV Aleksey Lvovich¹, doctor of technical sciences, professor, holder of the chair of water supply, sewage, engineering ecology and chemistry; BALOBANOV Aleksandr Sergeevich^{1,2}, lead engineer technologist

USING ULTRASONIC TECHNOLOGY TO INTENSIFY COAGULATION PROCESSES OF SURFACE WATER IN WATER TREATMENT SYSTEMS

¹Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (831) 430-54-87; e-mail: k_viv@nngasu.ru

²NPTs PromVodOchistka LLC.

20, Yablonevaya St., Nizhny Novgorod, Russia.

Tel.: (831) 262-16-01; e-mail: info@prom-water.ru

Key words: water treatment, water quality, ultrasound, coagulation, modernization.

This article presents an analysis of the use of ultrasonic emitters in water treatment systems.

REFERENCES

1. Khasanov O. L., Dvilis E. S., Polisadova V. V., Zykova A. P. Effekty moshchnogo ul'trazvukovogo vozdeystviya na strukturu i svoystva nanomaterialov [Effects of powerful ultrasonic exposure on the structure and properties of nanomaterials] : uchebnoe posobie [textbook]. Tomsk, TPU, 2009, 148 p.
2. Margulis M. A. Zvukhkhimicheskie reaktsii i sonoluminestsentsiya [Sonochemical reactions and sonoluminescence]. Moscow, Khimiya, 1986, 285 p.
3. Khmelev V. N., Slivin A. N., Barsukov R. V. [et al.] Primenenie ultrazvuka vysokoy intensivnosti v promyshlennosti [Application of high-intensity ultrasound in industry]. Biysk, Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta, 2010, 203 p. ISBN 978-5-9257-0187-4.
4. Myuller G. V. Teoriya koagulyatsii polidispersnykh sistem [Theory of coagulation of polydisperse systems]. Koagulyatsiya kolloidov [Coagulation of colloids]. pod redaktsiey A. I. Rabinovicha, P. S. Vasileva. Moscow ; Leningrad, ONTI, 1936, P. 7–40.
5. Averina Yu. M., Moiseeva N. A., Shuvalov D. A. [et al.] Kavitatsionnaya obrabotka vody. Svoystva vody i effektivnost obrabotki [Cavitation water treatment. Water properties and treatment efficiency]. Uspakhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii [Advances in Chemistry and Chemical Technology]. 2018, Vol. 32, № 14 (210), P. 17–19.
6. Vikulina V. B., Vikulin P. D. Ochistka vody koagulyatsiey pod deystviem ultrazvukovogo polya [Water purification by coagulation under the action of an ultrasonic field]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. 2016, № 10, P. 116–119.
7. Vasilev A. L., Vorobeva E. V. Opyt primeneniya ultrazvukovykh kolebaniy v tekhnologii vodopodgotovki [Experience in the application of ultrasonic vibrations in water treatment technology]. Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture. Stroitel'stvo i stroitelnye tekhnologii [Traditions and innovations in construction and architecture. Construction and construction technologies] : Sbornik statey 79-oy vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Samara, 18-22 aprelya 2022. pod redaktsiey M. V. Shuvalova, A. A. Pishchuleva,



A. K. Strelkova. Samara, Samarskiy gosudarstvenny tekhnicheskiy universitet, 2022, P. 538–544.

8. Khmelev V. N., Levin S. V., Khmelev S. S. [et al.] Vyyavlenie prichin snizheniya effektivnosti primeneniya ultrazvukovykh apparatov [Identification of the reasons for the decrease in the efficiency of using ultrasonic devices]. Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik [South Siberian Scientific Bulletin]. 2014, № 1 (5), P. 48–50.

9. Leong T.S.H., Manickam S., Martin G.J.O., Li W., Ashokkumar M. Applications of Ultrasonic Emulsification. In: Ultrasonic Production of Nano-emulsions for Bioactive Delivery in Drug and Food Applications. Springer: Briefs in Molecular Science, 2018. DOI 10.1007/978-3-319-73491-0_1.

10. Seyed M., Mohsen M.-G., Roghayeh G.-G., Massoud M., Pedram Safarpoura S., Majid Z. Ultrasonic nano-emulsification - A review. Ultrasonics - Sonochemistry. 2019. 52. P. 88–105.

© А. Л. Васильев, А. С. Балобанов, 2026

Получено: 22.04.2026 г.



УДК 628.8:697.911

М. В. БОДРОВ¹, д-р техн. наук, зав. кафедрой отопления и вентиляции;
В. В. МИРОНОВ², д-р техн. наук, проф., проф. кафедры инженерных систем и сооружений; **А. Н. ПЫЛАЕВ¹**, аспирант кафедры отопления и вентиляции;
А. В. БЕШЛЯГА¹, магистрант кафедры отопления и вентиляции

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА НИЗКОНАПОРНЫХ ВИХРЕВЫХ ТРУБ В СИСТЕМАХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

¹ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел./факс: (831) 430-54-85; эл. почта: tes84@inbox.ru

²ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет».

Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38.

Тел.: (3452) 28-37-45; эл. почта: mironovvv@tyuiu.ru

Ключевые слова: вихревые трубы, параллельное присоединение, холодопроизводительность, температурная эффективность.

Рассмотрены области применения и методика расчета вихревых энергоразделителей при проектировании систем кондиционирования воздуха. Получены аналитические зависимости по определению основных энергетических параметров низконапорных вихревых труб. Приведен пример расчета основных термодинамических параметров параллельно соединенных вихревых труб.

Введение

В настоящее время специалисты строительной отрасли нашей страны рассматривают различные возможности для снижения энергопотребления и повышения экологической безопасности систем обеспечения параметров микроклимата гражданских и промышленных объектов. Как известно, одними из самых энергоемких являются системы кондиционирования воздуха, которые, ввиду применения фреона, не всегда соответствуют экологическим требованиям [1–4].

Применение низконапорных вихревых труб (ВТ) для охлаждения воздуха, несмотря на их низкую стоимость, конструктивную простоту и высокую надежность в работе, встречается на практике довольно редко, в основном, в системах невысокой производительности по воздуху [1, 5].

Температура охлажденного воздуха (T_1) после вихревой трубы при постоянных параметрах сжатого воздуха на входе определяются отношением μ массового расхода охлажденного воздуха (G_x) к массовому расходу сжатого воздуха (G). Отметим, что наиболее низкая температура охлажденного воздуха достигается при значениях $\mu = 0,25...0,3$, а максимальная холодопроизводительность – при $\mu = 0,6...0,7$ [6–8].

Методы исследований

Для анализа процессов динамики изменения температуры охлажденного воздуха независимо от изменения расхода можно использовать две параллельно



работающие ВТ, принципиальная схема которых представлена на рис. 1. Предложенная установка является наиболее рациональной и экономичной при работе основной ВТ 1 в постоянном режиме при значениях $\mu = 0,6 \dots 0,7$, а дополнительная ВТ 2, обвязанная параллельно с основной ВТ 1, служит только для изменения параметров температуры охлажденного воздуха [9].

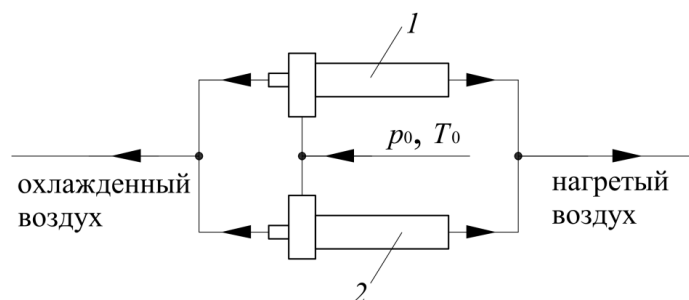


Рис. 1. Схема установки с двумя параллельно включенными вихревыми трубами: 1 – основная вихревая труба; 2 – дополнительная вихревая труба

Методологически авторами предложен следующий способ расчета двух параллельно работающих вихревых труб.

При выполнении первого этапа расчетов исследуются оптимальные режимы эксплуатации основной ВТ 1 путем определения массового расхода охлажденного воздуха μ по заданным значениям холодопроизводительности установки Q_x , Вт, и величине охлаждения воздуха Δt_x , °С.

При выполнении второго этапа расчетов, задавшись оптимальной величиной $\mu = 0,65$, находят полный расход сжатого воздуха G , кг/ч. Необходимое давление сжатого воздуха p_0 , Па, определяется по графику, приведенному авторами на рис. 2, по обобщенным характеристикам ВТ [1], используя метод последовательных приближений.

На рис. 2: η – температурная эффективность вихревой трубы по охлажденному воздуху; η_r – температурная эффективность вихревой трубы по нагретому воздуху; π – степень расширения сжатого воздуха; F_c – величина площади входного сечения сопла ВТ, отнесенная к площади поперечного сечения вихревой трубы; D_d – диаметр отверстия диафрагмы.

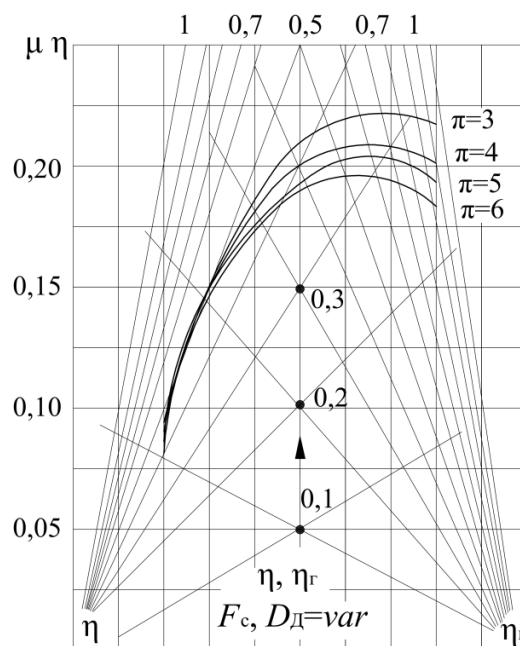


Рис. 2. Обобщенные характеристики вихревой трубы

Во-первых, задаются произвольной величиной $\pi = \frac{p_0}{p_x}$ отношения давлений сжатого p_0 и охлажденного p_x воздуха.

По известным значениям величин μ и π из обобщенных характеристик (рис. 2) определяется температурная эффективность вихревой трубы:

$$\eta = \frac{\Delta t_x}{\Delta t_s}, \quad (1)$$

где Δt_x – заданная величина охлаждения воздуха в основной ВТ;

Δt_s – величина охлаждения воздуха при изоэнтропийном расширении.

Следовательно, можно получить, что $\Delta t_s = \frac{\Delta t_x}{\eta}$.

Во-вторых, по известному соотношению [2, 3] значение величины охлаждения воздуха при изоэнтропийном расширении Δt_s составляет:

$$\Delta t_s = T_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{\pi} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \quad (2)$$

откуда можно найти отношения давлений π :

$$\pi = \frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta t_s}{T_0} \right)^{\frac{k}{k-1}}}, \quad (3)$$

где T_0 – температура сжатого воздуха на входе в вихревую трубу;

k – показатель адиабаты для воздуха.



После определения по зависимости (2) величины Δt_s находят из уравнения (3) уточненное значение отношения давлений π . Затем, по оптимальной величине μ и уточненному значению π определяют из обобщенных характеристик (рис. 2) уточненное значение температурной эффективности η . Если последнее и предыдущее значения η не совпадают, то расчет повторяется по уточненному значению η до совпадения конечной и предыдущей величин η .

Определив таким образом необходимое значение π , находят давление сжатого воздуха p_0 , задавшись предварительно величиной давления охлажденного воздуха p_x , Па, (как правило, абсолютное давление $p_x = 1,0$ атм). Конструктивные размеры основной вихревой трубы рассчитывают по расходу, давлению и температуре сжатого воздуха. При этом давление сжатого воздуха перед дополнительной и основной вихревыми трубами принимают одинаковыми.

В случае необходимости сохранения постоянного расхода охлажденного воздуха при изменении его температуры дополнительную вихревую трубу рассчитывают на минимальные значения расхода сжатого воздуха, при котором конструктивные (геометрические и технологические) размеры ВТ оказываются еще приемлемыми.

Если при изменении температуры охлажденного воздуха необходимо значительно изменять его расход, дополнительную вихревую трубу рассчитывают, соответственно, на большие расходы сжатого воздуха.

При проведении расчетов для дополнительной вихревой трубы считают заданными следующие величины: отношение расходов воздуха m , охлажденного в дополнительной и основной трубах; значение отношения давлений π ; температуру сжатого воздуха T_0 ; температуру T_1 воздуха, охлажденного в основной ВТ; температуру воздуха T после смешения потоков охлажденного воздуха, выходящих из обеих вихревых труб.

Температура T после смешения определяется по формуле:

$$T = \frac{T_1 + m \cdot T_2}{1 + m}, \quad (4)$$

где T_1 и T_2 – абсолютные температуры, соответственно, первого и второго потоков;

m – отношение массовых расходов второго и первого потоков.

Используя уравнение (4), находят необходимую температуру воздуха, охлажденного в дополнительной ВТ:

$$T_2 = \frac{T \cdot (1 + m) - T_1}{m}, \quad (5)$$

а величина охлаждения воздуха в дополнительной ВТ составляет:

$$\Delta t_s = T_0 - T_2. \quad (6)$$

Значение величины Δt_s подсчитывают по уравнению (2), а величину η – по уравнению (1). Затем по обобщенным характеристикам вихревой трубы (рис. 2) для известных π и η определяют соответствующее значение величины μ .

Зная массовый расход охлажденного воздуха G_x , кг/ч, и величину μ для дополнительной вихревой трубы, находят полный расход сжатого воздуха этой трубой G , кг/ч. Конструктивные размеры дополнительной вихревой трубы определяют по значениям расхода, давления и температуры сжатого воздуха [10, 11].



Выводы по проведенным исследованиям

В качестве заключения приведем следующий пример расчета параллельно соединенных низконапорных вихревых труб.

Исходные данные. Определить необходимое давление сжатого воздуха перед вихревыми трубами и величину μ_2 для дополнительной вихревой трубы, если известны: температура сжатого воздуха $T_0 = 27^\circ\text{C}$; величина охлаждения воздуха в основной вихревой трубе $\Delta t_{x1} = 30^\circ\text{C}$; относительный расход охлажденного воздуха в основной вихревой трубе $\mu_1 = 0,65$; отношение расходов воздуха, охлажденного в дополнительной и основной вихревых трубах $m = 0,2$; температура воздуха, поступающего к потребителю после смешения обоих потоков охлажденного воздуха, $T = -5^\circ\text{C}$; показатель адиабаты для воздуха $k = 1,4$.

Решение. 1. Задаемся в первом приближении величиной $\pi_1 = 4$ и по рис. 2 для $\mu_1 = 0,65$ находим $\eta_1 = 0,33$. Из уравнения (2) определяем изэнтропийный перепад температур:

$$\Delta t_{s1} = \frac{\Delta t_{x1}}{\eta_1} = \frac{30}{0,33} = 91.$$

2. Из уравнения (3) находим уточненное отношение давлений π_1 , соответствующее этому перепаду температур:

$$\pi_1 = \frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta t_{s1}}{T_0}\right)^{\frac{k}{k-1}}} = \frac{1}{\left(1 - \frac{91}{300}\right)^{3,5}} = 3,54.$$

3. По найденному значению $\pi_1 = 3,54$ и величине $\mu_1 = 0,65$ находим по рис. 2 новое значение $\eta_1 = 0,39$, которому соответствует изэнтропийный перепад температур:

$$\Delta t_{s1} = \frac{30}{0,39} = 77,$$

и вторично уточненное отношение давлений:

$$\pi_1 = \frac{1}{\left(1 - \frac{77}{300}\right)^{3,5}} = 2,8.$$

4. При значениях $\pi_1 = 2,8$ и $\mu_1 = 0,65$ из графика на рис. 2 находим $\eta_1 = 0,365$. Вновь найденной величине η_1 соответствует изэнтропийный перепад температур:

$$\Delta t_{s1} = \frac{30}{0,365} = 82,$$

и в третий раз уточненное отношение давлений равно:

$$\pi_1 = \frac{1}{\left(1 - \frac{82}{300}\right)^{3,5}} = 3,06.$$

5. По рис. 2 для значений $\pi_1 = 3,06$ и $\mu_1 = 0,65$ находим $\eta_1 = 0,36$. Эта величина достаточно хорошо и точно совпадает с предыдущим значением $\eta_1 = 0,365$, поэтому окончательно принимаем величину $\pi_1 = 3,06$. Считая



абсолютное давление охлажденного воздуха $p_x = 1$ атм, определяем искомую величину абсолютного давления сжатого воздуха:

$$p_0 = \pi_1 \cdot p_x = 3,06 \cdot 1 = 3,06 \text{ атм.}$$

Такое же давление сжатого воздуха принимаем и для дополнительной вихревой трубы.

6. Из уравнения (5) находим необходимую температуру воздуха, охлажденного в дополнительной вихревой трубе:

$$T_2 = \frac{T \cdot (1 + m) - T_1}{m} = \frac{268 \cdot (1 + 0,2) - 270}{0,2} = 262 \text{ К} = -11 \text{ }^\circ\text{C}.$$

7. Величина охлаждения воздуха в дополнительной ВТ составляет:

$$\Delta t_{x2} = T_0 - T_2 = 27 - (-11) = 38 \text{ }^\circ\text{C}.$$

8. Считая отношение давлений таким же, как и в основной вихревой трубе ($\pi_2 = \pi_1 \approx 3$), определяем соответствующий изоэнтропийный перепад температур в дополнительной вихревой трубе:

$$\Delta t_{s2} = T_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{\pi_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = 300 \cdot \left(1 - \frac{1}{3^{0,286}} \right) = 81 \text{ }^\circ\text{C},$$

чему соответствует температурная эффективность:

$$\eta_2 = \frac{\Delta t_{x2}}{\Delta t_{s2}} = \frac{38}{81} = 0,47.$$

По рис. 2 для $\pi_2 = 3$ и $\eta_2 = 0,47$ находим требуемую величину относительного расхода охлажденного воздуха $\mu_2 = 0,35$.

Авторами рекомендуется использование предлагаемой методики при проектировании и конструировании экологически безопасных систем кондиционирования воздуха на основе применения вихревых энергоразделителей на машиностроительных и сельскохозяйственных предприятиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дыскин, Л. М. Вихревые термостаты и воздухоохладители : учебное пособие / Л. М. Дыскин ; Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского. – Нижний Новгород : НАСИ, 1991. – 85 с. – ISBN 5-230-04126-9.
2. Меркулов, А. П. Вихревой эффект и его применение в технике / А. П. Меркулов. – Москва : Машиностроение, 1969. – 183 с.
3. Кузнецов, В. И. Физико-математическая модель рабочего процесса вихревой трубы / В. И. Кузнецов, В. В. Макаров, А. Ю. Шандер // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. – 2021. – Т. 5, № 2. – С. 78–87. – DOI 10.25206/2588-0373-2021-5-2-78-87.
4. Вихревые аппараты / А. Д. Сулов, С. В. Иванов, А. В. Мурашкин, Ю. В. Чижиков. – Москва : Машиностроение, 1985. – 256 с.
5. Сентяков, Б. А. Вихревой энергоразделитель потока / Б. А. Сентяков, А. Д. Холов // Автоматизация. Современные технологии. – 2021. – Т. 75, № 7. – С. 311–313.
6. Abdullaev, B. Natural gas purification from high hydrocarbons in a vortex tube / B. Abdullaev, A. Begmatov // Universum : технические науки. – 2025. – No. 5 (134). – P. 29–32. – DOI 10.32743/UniTech.2025.134.5.20000.



7. Пиралишвили, Ш. А. Численное исследование характеристик вихревой трубы с дополнительным потоком в стационарной и нестационарной постановках / Ш. А. Пиралишвили, О. А. Соколова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва. – 2015. – Т. 14, № 2. – С. 151–158. – DOI 10.18287/2412-7329-2015-14-2-151-158.

8. Картапов, Б. А. Разработка математической модели вихревой трубы / Б. А. Картапов // Актуальные проблемы инженерных наук : материалы VIII (65-й) ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета, Ставрополь, 12–30 апреля 2021 года. – Ставрополь : Издательский дом «Тэсэра», 2021. – С. 304–309. – ISBN 9485950055690. – EDN МРНОАХ.

9. Шайкина, А. А. Численное моделирование рабочего процесса вихревой трубы с дополнительным потоком в нестационарной постановке / А. А. Шайкина, Е. А. Попкова // Наука. Образование. Общество : материалы Всероссийской научно-технической конференции, Рыбинск, 12-13 октября 2017 года. Том 1. – Рыбинск : Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева, 2017. – С. 132–136.

10. Gutak, A. D. Experimental investigation and industrial application of Ranque-Hilsch vortex tube / A. D. Gutak // International Journal of Refrigeration. – 2015. – Vol. 49. – P. 93–98. – DOI 10.1016/j.ijrefrig.2014.09.021.

11. Xue, Y. A critical review of temperature separation in a vortex tube / Y. Xue, M. Arjomandi, R. Kelso // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2010. – Vol. 34 (8). – P. 1367–1374. – DOI 10.1016/j.expthermflusci.2010.06.010.

BODROV Mikhail Valerevich¹, doctor of technical sciences, professor, holder of the chair of heating and ventilation; MIRONOV Victor Vladimirovich², doctor of technical sciences, professor, professor of the chair of engineering systems and structures; PYLAEV Aleksandr Nikolaevich¹, postgraduate student of the chair of heating and ventilation; BESHLYAGA Artyom Vladislavovich¹, master degree student of the chair of heating and ventilation

RESEARCH OF CALCULATION METHODS OF LOW-PRESSURE VORTEX TUBES IN AIR CONDITIONING SYSTEMS

¹Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel./fax: (831) 430-54-85; e-mail: tes84@inbox.ru

²Tyumen Industrial University.

38, Volodarsky St., Tyumen, 625000, Russia.

Tel.: (3452) 28-37-45; e-mail: mironovvv@tyuiu.ru

Key words: vortex tubes, parallel connection, refrigeration capacity, temperature efficiency.

This paper examines the practical applications and engineering calculation methodologies for vortex energy separators in the design of air conditioning systems. Analytical correlations have been derived to determine the primary energy performance parameters of low-pressure vortex tubes. Additionally, a practical example demonstrating the calculation of the key thermodynamic parameters for a parallel vortex tube configuration is presented.

REFERENCES

1. Dyskin L. M. Vikhrevye termostaty i vozdukhokladiteli [Vortex thermostats and air coolers] : uchebnoe posobie. Nizhny Novgorod, NASI, 1991, 85 p. ISBN 5-230-04126-9.



2. Merkulov A. P. Vikhrevoy effekt i yego primeneniye v tekhnike [Vortex effect and its application in engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1969, 183 p.
3. Kuznetsov V. I., Makarov V. V., Shander A. Yu. Fiziko-matematicheskaya model rabocheho protsessa vikhrevoy truby [Physico-mathematical model of the working process of a vortex tube]. Omskiy nauchnyy vestnik. Seriya Aviatsionno-raketnoe i energeticheskoe mashinostroyeniye [Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering]. Omsk, 2021, Vol. 5, № 2, P. 78–87. DOI 10.25206/2588-0373-2021-5-2-78-87.
4. Suslov A. D., Ivanov S. V., Murashkin A. V., Chizhikov Yu. V. Vikhrevye apparaty [Vortex apparatus]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1985, 256 p.
5. Sentyakov B. A., Kholov A. D. Vikhrevoy energorazdelitel potoka [Vortex flow energy separator]. Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii [Automation. Modern Technologies]. Moscow, 2021, Vol. 75, № 7, P. 311–313.
6. Abdullaev B., Begmatov A. Natural gas purification from high hydrocarbons in a vortex tube. Universum : tekhnicheskie nauki [Universum: Technical Sciences]. 2025, № 5 (134), P. 29–32. DOI 10.32743/UniTech.2025.134.5.20000.
7. Piralishvili Sh. A., Sokolova O. A. Chislennoe issledovaniye kharakteristik vikhrevoy truby s dopolnitelnym potokom v statsionarnoy i nestatsionarnoy postanovkakh [Numerical study of the characteristics of a vortex tube with an additional flow in steady and unsteady formulations]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S. P. Korolyova [Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering]. Samara, 2015, Vol. 14, № 2, P. 151–158. DOI 10.18287/2412-7329-2015-14-2-151-158.
8. Kartapov B. A. Razrabotka matematicheskoy modeli vikhrevoy truby [Development of a mathematical model of a vortex tube]. Aktualnye problemy inzhernykh nauk [Actual problems of engineering sciences]: materialy VIII (65-y) yezhegodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Severo-Kavkazskogo federalnogo universiteta, 12–30 aprelya 2021 goda. Stavropol, Tesera, 2021, P. 304–309. ISBN 9485950055690. EDN MPHOAX.
9. Shaykina A. A., Popkova E. A. Chislennoe modelirovaniye rabocheho protsessa vikhrevoy truby s dopolnitelnym potokom v nestatsionarnoy postanovke [Numerical simulation of the working process of a vortex tube with an additional flow in an unsteady formulation]. Nauka. Obrazovaniye. Obshchestvo [Science. Education. Society] : materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 12-13 oktyabrya 2017 goda. Vol 1. Rybinsk, Rybinskiy gosudarstvennyy aviatsionnyy tekhnicheskiiy universitet im. P. A. Solovyova, 2017, P. 132–136.
10. Gutak A. D. Experimental investigation and industrial application of Ranque-Hilsch vortex tube. International Journal of Refrigeration. 2015, Vol. 49, P. 93–98. DOI 10.1016/j.ijrefrig.2014.09.021.
11. Xue Y., Arjomandi M., Kelso R. A critical review of temperature separation in a vortex tube. Experimental Thermal and Fluid Science. 2010, Vol. 34 (8), P. 1367–1374. DOI 10.1016/j.expthermflusci.2010.06.010.

© М. В. Бодров, В. В. Миронов, А. Н. Пылаев, А. В. Бешляга, 2026

Получено: 08.04.2026 г.



УДК 628.35

С. М. ГУСЕЙНОВА, ст. преп. кафедры водоснабжения, водоотведения, инженерной экологии и химии; **А. Л. ВАСИЛЬЕВ**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой водоснабжения, водоотведения, инженерной экологии и химии; **И. В. КАТРАЕВА**, доц. кафедры водоснабжения, водоотведения, инженерной экологии и химии; **О. В. КАЛИНА**, преподаватель

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ ВОЗВРАТНЫХ ВОД УЧАСТКОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ОСАДКОВ ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-54-87; эл. почта: k_viv@nngasu.ru

Ключевые слова: фугат, фильтрат, возвратные потоки, очистка сточных вод, загрязнение водных объектов, биологическая очистка, биогенные элементы, городские очистные сооружения, обезвоживание осадка.

В статье выполнен анализ процессов образования возвратных вод после обезвоживания осадков на городских очистных сооружениях, рассматриваются особенности применения при обезвоживании метода центрифугирования и фильтр-прессования, проанализированы основные качественные и количественные характеристики фугата и фильтрата, влияние их возврата в начало очистных сооружений на эффективность работы станций и на содержание в общем потоке сточных вод биогенных соединений, описаны основные перспективные методы очистки высококонцентрированных возвратных вод и возможности их применения.

Одним из основных источников поступления загрязняющих веществ в водные объекты являются хозяйственно-бытовые и промышленные сточные воды, которые аккумулируются с городской территории и направляются на очистные сооружения канализации (далее – ОСК).

ОСК крупнейших городов в России, как правило, относятся к 1 категории негативного воздействия на окружающую среду (далее – НВОС). Некоторые сооружения в соответствии с приказом Министерства внесены в перечень объектов, вклад которых в суммарные сбросы загрязняющих веществ по стране составляет не менее чем 60 % [1].

Промышленные и хозяйственно-бытовые сточные воды, направляемые на очистку на ОСК, насыщены органическими и биогенными веществами, в том числе содержащими азот и фосфор. Данные экологического мониторинга подтверждают актуальность проблемы загрязнения водных объектов данными соединениями. К примеру, за период наблюдений с 2013 по 2024 год вода в водных объектах, относящихся к бассейну Горьковского водохранилища, имела класс качества «загрязненная» или «очень загрязненная» [2–5]. При этом наиболее часто превышения ПДК фиксировались по нитритному азоту, аммонийному азоту и органическим веществам [6].

На сегодняшний день в России действуют нормативно-правовые акты,



регулирующие допустимый сброс сточных вод, однако несоблюдение установленных нормативов предприятиями и сброс недостаточно очищенных на ОСК городских сточных вод (далее – ГСВ) приводит к загрязнению водных объектов.

В соответствии со статьей 31.1 Федерального закона от 10.01.2002 №7-ФЗ «Об охране окружающей среды» с 1 января 2025 года хозяйственная деятельность на объектах НВОС 1 категории, к которым относятся ОСК, может осуществляться только при наличии комплексного экологического разрешения (далее – КЭР) [7]. Ужесточение природоохранных требований влечет за собой необходимость модернизации ОСК, так как в крупных городах России большинство из них были построены во второй половине прошлого века и технически не могут обеспечить очистку стоков до обновленных нормативных значений. Однако процесс полномасштабной реконструкции ОСК является трудозатратным и дорогостоящим, а также влечет за собой приостановку работы сооружений на определенный период, что оказывает негативное воздействие на водные ресурсы.

Таким образом, актуальным направлением является оптимизация отдельных технологических процессов на ОСК.

Одной из наиболее актуальных задач в контексте модернизации ОСК является поиск решений по эффективной обработке возвратных вод, образующихся после участков механического обезвоживания осадков (далее – УМОО) ГСВ. Основная проблема заключается в том, что возвратные воды являются высококонцентрированными и направляются в начало очистных сооружений без предварительной обработки, что приводит к увеличению нагрузки на сооружения и вследствие этого к снижению эффективности очистки общего потока сточных вод [6].

Данный тип возвратных вод образуется на сверхкрупных (производительность 600000 м³/сут) и крупнейших (производительность 200000–600000 м³/сут) очистных сооружениях [8], в технологической схеме которых имеется этап сбраживания осадка в метантенках.

На большинстве станций в России возвратные воды УМОО образуются в процессе обезвоживания осадков ГСВ с использованием центрифуг или фильтр-прессов. Основная функция процесса обезвоживания осадка заключается в уменьшении его влажности и разделении жидкой фазы (фугата в случае использования центрифуг и фильтрата в случае использования фильтр-прессов) от твердой – кека.

Осадок предварительно может обрабатываться реагентами (в подавляющем числе случаев органическими флокулянтами). В результате нарушения коллоидной структуры частиц осадка выделяется свободная вода, которая отделяется под давлением (в ленточных или камерных фильтр-прессах, либо шнековых прессах) или в центробежном поле (в центрифугах). Образующийся фильтрат (фугат) отводится.

Состав фугата и фильтрата зависит от исходного состава осадка и степени его предварительной обработки.

В случае с центрифугированием интенсивность отделения жидкой фазы определяется режимом и конструктивными особенностями центрифуги. Обезвоживание осадка в центрифугах может проводиться как с использованием реагентов, так и без них, что влияет на свойства образующегося фугата.

Принципиально иным является процесс образования фильтрата: осадок



сточных вод, предварительно обработанный методом флокуляции или коагуляции, подается в фильтр-пресс, где подвергается воздействию высокого давления, что способствует удалению свободной воды из осадка, уменьшению его объема и увеличению плотности.

В данной работе был проведен анализ состава фугата центрифуг и фильтрата фильтр-прессов, поэтому более подробно рассмотрены преимущества и недостатки именно этих вариантов обезвоживания (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительный анализ преимуществ и недостатков применения центрифугирования и фильтр-прессования для обезвоживания осадка ГСВ

| Критерий | Центрифугирование | Фильтр-прессование |
|--------------|--|--|
| Преимущества | Высокая производительность и непрерывность процесса, возможность автоматизации. Компактность установок, возможность работы по безреагентным схемам или с применением флокулянтов для повышения эффективности задержания сухого вещества до 90–95 %. | Очень низкая влажность осадка (40–50 %, особенно при предварительном кондиционировании реагентами). Сокращение расхода электроэнергии [9]. Высокое давление способствует эффективному отжиму. |
| Недостатки | Высокие показатели БПК и ХПК в фугате при безреагентной схеме. Быстрое изнашивание центрифуг при наличии в осадке абразивных включений, необходимость их предварительного удаления. Более высокие эксплуатационные затраты на электроэнергию по сравнению с фильтр-прессами. | Фильтровальная ткань со временем изнашивается и требует замены. Увеличение потребления энергии из-за необходимости термосушки. Затраты на реагенты. Эксплуатация может сопровождаться распространением запаха. |

Таким образом, применение метода центрифугирования позволяет сэкономить производственную площадь благодаря компактности, однако требует предварительного удаления песка и других абразивных веществ из осадка. Фильтр-пресс позволяет получить кек максимально низкой влажности и обеспечить меньший расход электроэнергии, однако требует использования реагентов.

Был проведен сравнительный анализ показателей фугата УМОО ОСК г. Москвы и фильтрата УМОО ОСК г. Нижнего Новгорода. На обеих станциях реализована многоступенчатая очистка, включающая стадии механической, биологической очистки и обеззараживания. Однако производительность рассматриваемых в данной работе ОСК г. Москвы почти в 5 раз выше производительности ОСК г. Нижнего Новгорода, также в г. Москва внедрены более сложные и современные методы очистки, включая глубокое удаление биогенных элементов.

И в фугате, и в фильтрате рассматриваемых ОСК обнаружено высокое содержание ионов аммония и фосфат-ионов, также более высокое содержание нитрат-ионов наблюдается в фугате (табл. 2).



Таблица 2

**Сравнительный анализ показателей фугата ОСК г. Москвы и фильтрата
ОСК г. Нижнего Новгорода**

| Показатель | Фугат (ОСК г. Москвы) | Фильтрат (ОСК г. Нижнего Новгорода) |
|--|--------------------------|--|
| ХПК, мг/дм ³ | 1270 | 256 |
| БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³ | 174 | 42,5 |
| Аммоний-ион, мг/дм ³ | 340 | 213 |
| Нитрат-ион, мг/дм ³ | 49,5 | 2,62 |
| Фосфат-ион, мг/дм ³ | 35,8 | 63,9 |

Фугат центрифуг имеет более высокие значения ХПК и БПК из-за присутствия органических веществ. Концентрации нитратов, фосфатов и аммония и в фугате, и в фильтрате отличаются и могут варьироваться в зависимости от исходного осадка и условий обработки, однако по всем трем показателям возвратные воды являются «высококонцентрированными».

Таким образом, на рассматриваемых очистных сооружениях г. Нижнего Новгорода и г. Москвы УМОО ОСК является местом образования возвратных потоков, насыщенных биогенными элементами.

На примере ОСК г. Нижнего Новгорода был проведен анализ изменения концентрации фосфатов в процессе очистки сточных вод и влияния возврата фильтрата без обработки в начало очистных сооружений (рис.).

При очистке сточных вод на этапе осветления после первичных отстойников в месте возврата неочищенного высококонцентрированного фильтрата концентрация фосфат-иона в воде возрастает на 0,7 мг/дм³.

Таким образом, возврат фильтрата без предварительной обработки приводит к увеличению содержания загрязняющих веществ в общем потоке сточных вод, что в свою очередь увеличивает нагрузку на ОСК и снижает эффективность очистки ГСВ.

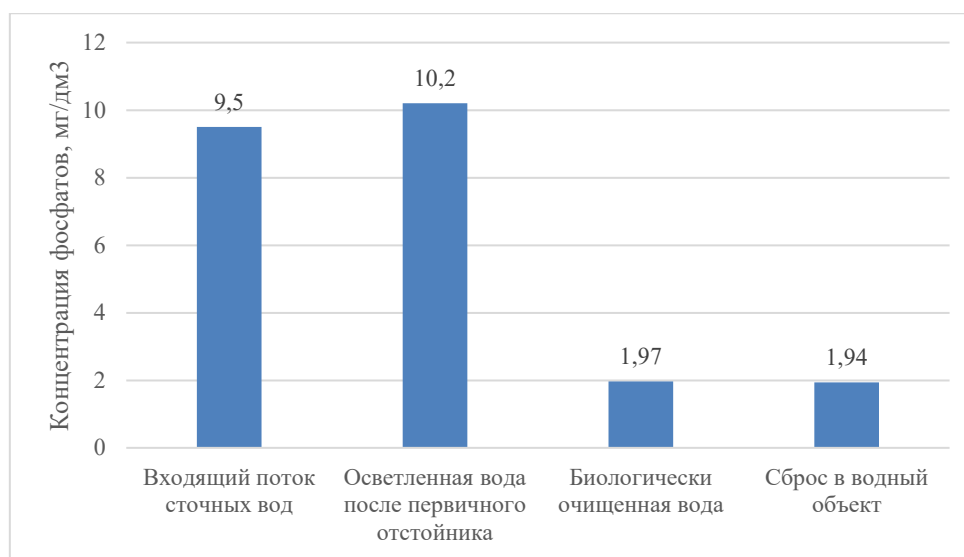


Рисунок. Анализ изменения концентрации фосфатов в процессе очистки сточных вод

Согласно данным справочника ИТС НДТ, из всех анкетизируемых при разработке справочника объектов ОСК, менее 10 % используют современные технологии, обеспечивающие удаление азота и фосфора [10], что подтверждает актуальность проблемы очистки сточных вод от данных биогенных элементов и обработки высококонцентрированного фугата и фильтрата перед возвратом в начало ОСК.

Согласно данным справочника ИТС НДТ, существующие технологии обработки возвратных вод УМОО в России имеют статус «перспективные» и отнесены к категориям А1, то есть применяются на некоторых объектах за рубежом, при этом в России выполнен большой объем исследований и разработаны новые конфигурации процесса, или к категории Б1, то есть не имеющим достаточного числа применений в России (более 5 применений), но также используемым за рубежом.

Среди перспективных технологий приведены очистка возвратных потоков от фосфатов с получением сырья для производства удобрения, где возвратный поток обрабатывается в реакторе с псевдоожиженным слоем песка с добавлением реагента (соль магния) с образованием потенциального фосфорно-азотного удобрения – струвита. Данный метод обеспечивает рекуперацию фосфора и снижение его концентрации в воде, что позволяет снизить негативное воздействие на водные объекты. Метод экономически целесообразно применять при концентрации фосфора фосфатов в возвратной воде от 50–70 мг/л и выше.

Для удаления соединений азота в качестве наиболее перспективных в ИТС НДТ рассматривается аноксидное окисление аммония с помощью анаммокс-технологии. Метод позволяет повысить эффективность и снизить себестоимость очистки возвратных потоков от азота. Для реализации метода применяется стационарная или подвижная иммобилизующая загрузка с анаммокс бактериями. В первом отдельном реакторе или в ходе совместного процесса происходит окисление аммония до нитрита, при этом оставшая часть аммония окисляется образовавшимся нитритом с образованием молекулярного азота. Метод позволяет обеспечить глубокое удаление азота при высокой энергоэффективности, но для



его осуществления необходимы анаэробные условия и отсутствие органического углерода.

Анализ процессов образования возвратных вод позволяет сделать вывод о том, что, несмотря на различия процессов центрифугирования и фильтропрессования, образующиеся на УМОО ГСВ фугат и фильтрат являются высококонцентрированными по содержанию соединений азота и фосфора. Возврат данных потоков в начало очистных сооружений перед первичными отстойниками увеличивает концентрацию биогенных элементов в общем потоке сточных вод, негативно влияет на работу сооружений и снижает эффективность очистки ГСВ.

Анализ технологий обработки возвратных вод УМОО ГСВ позволяет сделать вывод о том, что на данный момент не разработаны технологии их комплексной очистки от органических веществ, азота и фосфора, а избирательные методы очистки для отдельных биогенных веществ остаются в перечне перспективных и не имеют практического внедрения на ОСК в России. В связи с ужесточением природоохранных требований для объектов ОСК, относящимся к I категории НВОС, актуальным является внедрение на данных объектах локальных узлов комплексной доочистки возвратных вод с целью повышения эффективности очистки ГСВ и снижения негативного воздействия на окружающую среду.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Российская Федерация. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Об утверждении перечня объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, относящихся к I категории, вклад которых в суммарные выбросы, сбросы загрязняющих веществ в российской федерации составляет не менее чем 60 процентов : приказ Минприроды Российской Федерации от 18.04.2018 № 154. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Режим доступа: КонсультантПлюс. Законодательство. ВерсияПроф. – Текст : электронный.
2. Качество поверхностных вод Российской Федерации : ежегодник 2013 / редактор А. М. Никаноров. – Ростов-на-Дону : Гидрохимический институт : Росгидромет, 2014. – URL: <https://gidrohim.com/node/24>. – Текст : электронный.
3. Качество поверхностных вод Российской Федерации : ежегодник 2017 / редактор М. М. Трофимчук. – Ростов-на-Дону : Гидрохимический институт : Росгидромет, 2018. – URL: <https://gidrohim.com/node/72>. – Текст : электронный.
4. Качество поверхностных вод Российской Федерации : ежегодник 2021 / редактор М. М. Трофимчук. – Ростов-на-Дону : Гидрохимический институт : Росгидромет, 2022. – URL: <https://gidrohim.com/node/2796>. – Текст : электронный.
5. Качество поверхностных вод Российской Федерации : ежегодник 2024 / редактор М. М. Трофимчук. – Ростов-на-Дону : Гидрохимический институт : Росгидромет, 2023. – URL: <https://gidrohim.com/node/2843>. – Текст : электронный.
6. Васильев, А. Л. Анализ влияния возвратных потоков на эффективность биологической очистки городских сточных вод / А. Л. Васильев, С. М. Гусейнова, М. А. Патова // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2024. – № 3 (71). – С. 82–87. – EDN PKODRG.
7. Российская Федерация. Законы. Об охране окружающей среды : федеральный закон Российской Федерации от 10 января 2002 №7-ФЗ [принят Государственной Думой 20 декабря 2001 года : одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 года] : [с изм. и доп.,



вступ. в силу с 01.03.2026]. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Режим доступа: КонсультантПлюс. Законодательство. ВерсияПроф. – Текст : электронный.

8. Российская Федерация. Правительство. Об утверждении технологических показателей наилучших доступных технологий в сфере очистки сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений или городских округов : постановление Правительства Российской Федерации от 15 сентября 2020 № 1430. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Режим доступа: КонсультантПлюс. Законодательство. ВерсияПроф. – Текст : электронный.

9. Крымов, Р. С. Исследование процесса обезвоживания осадков городских сточных вод г. Красноперкопск / Р. С. Крымов, Н. С. Мельникова, С. В. Остренко. – Текст : электронный // Экономика строительства и природопользования. – 2022. – № 4 (85). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protsessa-obezvozhivaniya-osadkov-gorodskih-stochnyh-vod-g-krasnoperekopsk>.

10. ИТС 10-2019. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов : утвержден Приказом Росстандарта от 12.12.2019 № 2981 : дата введения 2020-09-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/564068889?ysclid=m8igyk8sli332534046>. – Текст : электронный.

GUSEINOVA Sayad Mukhtarovna, senior teacher of the chair of water supply, sewage, engineering ecology and chemistry; VASILEV Aleksey Lvovich, doctor of technical sciences, professor, holder of the chair of water supply, sewage, engineering ecology and chemistry; KATRAYEVA Inna Valentinovna, associate professor of the chair of water supply, sewage, engineering ecology and chemistry; KALINA Olga Vladimirovna, teacher

ANALYSIS OF FORMATION PROCESSES AND RETURN WATER TREATMENT TECHNOLOGIES FOR MECHANICAL SLUDGE DEWATERING FACILITIES IN MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (831) 430-54-87; e-mail: k_viv@nngasu.ru

Key words: centrate, filtrate, return flows, wastewater treatment, water body pollution, biological treatment, nutrients, municipal wastewater treatment plants, sludge dewatering.

This article presents an analysis of the formation processes of return water generated during sludge dewatering at municipal wastewater treatment plants. The study examines the specific operational features of centrifugation and filter press dewatering methods. It analyzes the primary qualitative and quantitative characteristics of the resulting centrate and filtrate, as well as the impact of returning these streams to the plant headworks on overall treatment efficiency and the nutrient load in the main wastewater flow. Furthermore, the article describes advanced prospective treatment methods for highly concentrated return water and discusses the potential for their practical application.

REFERENCES

1. Rossiyskaya Federatsiya. Ministerstvo prirodnnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii. Ob utverzhdenii perechnya obektov, okazyvayushchikh negativnoe vozdeystvie na



okruzhayushchuyu sredu, odnosyashchikhsya k 1 kategorii, vklad kotorykh v summarnye vybrosy, sbrosy zagryaznyayushchikh veshchestv v rossiyskoy federatsii sostavlyayet ne menee chem 60 protsentov [On Approval of the List of Facilities Having a Negative Impact on the Environment, Classified in Category 1, the Contribution of Which to the Total Emissions and Discharges of Pollutants in the Russian Federation is at Least 60 Percent] : prikaz Minprirody Rossiyskoy Federatsii ot 18.04.2018 № 154. URL: <http://www.consultant.ru>. Access mode: ConsultantPlus. Legislation. VersionProf.

2. Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiyskoy Federatsii [Quality of Surface Waters of the Russian Federation]: ezhegodnik 2013. redaktor A. M. Nikanorov. Rostov-on-Don, Gidrokhimicheskiy institut : Rosgidromet, 2014. URL: <https://gidrohim.com/node/24>.

3. Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiyskoy Federatsii 2017 [Quality of Surface Waters of the Russian Federation]: ezhegodnik. redaktor M. M. Trofimchuk. Rostov-on-Don, Gidrokhimicheskiy institut : Rosgidromet, 2018. URL: <https://gidrohim.com/node/72>.

4. Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiyskoy Federatsii [Quality of Surface Waters of the Russian Federation]: ezhegodnik 2021. redaktor M. M. Trofimchuk. Rostov-on-Don, Gidrokhimicheskiy institut : Rosgidromet, 2022. URL: <https://gidrohim.com/node/2796>.

5. Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiyskoy Federatsii [Quality of Surface Waters of the Russian Federation]: ezhegodnik 2024. redaktor M. M. Trofimchuk. Rostov-on-Don, Gidrokhimicheskiy institut : Rosgidromet, 2023. URL: <https://gidrohim.com/node/2843>.

6. Vasilev A. L., Guseynova S. M., Patova M. A. Analiz vliyaniya vozvratnykh potokov na effektivnost biologicheskoy ochistki gorodskikh stochnykh vod [Analysis of the impact of return flows on the efficiency of biological treatment of municipal wastewater]. Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2024, № 3 (71), P. 82–87. EDN PKODRG.

7. Rossiyskaya Federatsiya. Zakony. Ob okhrane okruzhayushchey sredy [On Environmental Protection] : federalny zakon Rossiyskoy Federatsii ot 10 yanvarya 2002 №7-FZ. [prinyat Gosudarstvennoy Dumoy 20 dekablya 2001 goda : odobren Sovetom Federatsii 26 dekablya 2001 goda]: [s izm. i dop., vstup. v silu s 01.03.2026]]. URL: <http://www.consultant.ru>. Access mode: ConsultantPlus. Legislation. VersionProf.

8. Rossiyskaya Federatsiya. Pravitelstvo. Ob utverzhdenii tekhnologicheskikh pokazateley nailuchshikh dostupnykh tekhnologiy v sfere ochistki stochnykh vod s ispolzovaniem tsentralizovannykh sistem vodootvedeniya poseleniy ili gorodskikh okrugov [On Approval of Technological Indicators of Best Available Technologies in the Field of Wastewater Treatment Using Centralized Sewerage Systems of Settlements or Urban Okrugs] : postanovlenie Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 15 sentyabrya 2020 № 1430. URL: <http://www.consultant.ru>. Access mode: ConsultantPlus. Legislation. VersionProf.

9. Krymov R. S., Melnikova N. S., Ostrenko S. V. Issledovanie protsessa obezvozhivaniya osadkov gorodskikh stochnykh vod g. Krasnoperekopsk [Study of the dewatering process of municipal wastewater sludge in Krasnoperekopsk]. Ekonomika stroitelstva i prirodopolzovaniya [Economics of Construction and Nature Management]. 2022, № 4 (85). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protssesa-obevozhozhivaniya-osadkov-gorodskikh-stochnykh-vod-g-krasnoperekopsk>.

10. ITS 10-2019. Informatsionno-tekhnicheskii spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam. Ochistka stochnykh vod s ispolzovaniem tsentralizovannykh sistem vodootvedeniya poseleniy, gorodskikh okrugov [Information and Technical Reference Book on Best Available Technologies. Wastewater Treatment Using Centralized Sewerage Systems of Settlements, Urban Okrugs] : utverzhen Prikazom Rosstandarta ot 12.12.2019 № 2981 : data vvedeniya 2020-09-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564068889?ysclid=m8igyk8s1i332534046>.

© С. М. Гусейнова, А. Л. Васильев, И. В. Катраева, О. В. Калина, 2026

Получено: 03.04.2026 г.



УДК 697.1:621.565.83

М. В. БОДРОВ, д-р техн. наук, зав. кафедрой отопления и вентиляции;
А. Е. РУИН, ассистент кафедры отопления и вентиляции; **А. А. СМЫКОВ**,
канд. техн. наук, доц. кафедры отопления и вентиляции; **А. Д. ЕЛИЗАРОВ**,
магистрант кафедры отопления и вентиляции

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОФИЛЕЙ СИСТЕМ РАДИАЦИОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-54-85; эл. почта: tes84@inbox.ru

Ключевые слова: водяное охлаждение, теплофизика, энергосбережение, энергоэффективность, радиационное охлаждение.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований алюминиевых профилей Flower 225, применяемых в низкотемпературных системах радиационного охлаждения. Представлены основные результаты экспериментального исследования теплотехнических характеристик исследуемых профилей, а также математические зависимости мощности охлаждающего профиля от температурного напора. Авторами разработаны методические рекомендации по расчету систем радиационного охлаждения на базе водяных охлаждающих профилей.

Введение

В виду постоянной тенденции роста цен энергетических ресурсов, вопрос о снижении энергопотребления зданий и сооружений является актуальным в наше время. Кроме того, ископаемое топливо, которое имеет в настоящее время наибольшую популярность для выработки тепловой и электрической энергии, ограничивается природными запасами. Эти факторы вынуждают применять новые инновационные энергосберегающие технологии и системы, которые позволят максимально рационально использовать энергетические ресурсы.

Одним из таких решений является применение реверсивных радиационных систем отопления и охлаждения. Данные системы обеспечения параметров микроклимата позволяют снизить энергопотребление зданием как в холодный период года, так и в теплый. Снижение потребляемой тепловой и электрической энергии происходит за счет более высокой (в режиме работы – отопление [1–4]) или более низкой (в режиме работы – охлаждение [5]) радиационной температуры обслуживаемого системой помещения. Это позволяет обеспечить более комфортные параметры микроклимата при более высокой (система охлаждения) [6] или более низкой (система отопления) температуре внутреннего воздуха. При этом применение одной и той же системы для разных режимов работы (отопление и охлаждение) позволяет снизить капитальные вложения к минимуму [7–10].

Авторами отмечается, что реверсивные системы радиационного отопления и охлаждения в настоящее время являются недостаточно изученными и нуждаются в дополнительных как в теоретических, так и натурных исследованиях, а

существующие методические рекомендации по расчету и проектированию таких систем являются неактуальными и устаревшими. Результаты исследований низкотемпературных лучистых систем отопления были опубликованы ранее в таких научных трудах, как [2–4].

В настоящей статье приведены результаты лабораторных исследований теплотехнических характеристик охлаждающих профилей радиационных систем охлаждения.

Материалы и методы исследований

Исследования, посвященные изучению теплотехнических характеристик охлаждающих профилей систем радиационного охлаждения, проводились в учебно-научно-исследовательском центре «СОНИИ», основанном в ННГАСУ в 2019 году (рис. 1). Учебно-научно-исследовательский центр оснащен рядом исключительных контрольно-измерительных приборов, необходимых для изучения тепло-влажностного режима помещения и теплотехнических параметров оборудования [2–4].

Объектом исследования является охлаждающий профиль *Flower 225* из сплава алюминия $AlMgSi0.5$, который в последующем подвергается анодированию. В связи с этим опытный образец имеет высокие антикоррозионные характеристики и способен выдержать достаточно высокие температуры, поэтому максимальная рабочая температура ограничивается только характеристиками источника теплоты. Внешний вид и основные технические характеристики профиля *Flower 225*, предоставленного для теплотехнических испытаний промышленным партнером ННГАСУ ООО «Флайг+Хоммель», приведены в табл. 1.




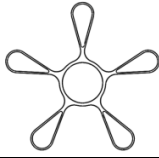
Рис. 1. Общий вид Лаборатории лучистого отопления

Целью лабораторных испытаний было определение фактической удельной мощности 1 п. м охлаждающего профиля $q_{изл}$, Вт. Испытание проводилось при помощи индивидуальной лабораторной установки, схема которой представлена на рис. 2. Лабораторная установка представляет собой комплекс контрольно-измерительных приборов, оборудования и системы уникального подвеса для изменения пространственного положения испытуемых профилей в объеме помещения лаборатории.



Таблица 1

Основные характеристики профиля *Flower 225*

| Характеристики | Ед. изм. | Марка излучателя |
|---|---------------------|---|
| | | <i>Flower 225</i> |
| Внешний вид профиля | |  |
| Вид поперечного сечения | - |  |
| Материал | - | AlMgSi0,5 |
| Размеры | мм | 225x225 |
| Удельная площадь | м ² /п.м | 1,07 |
| Удельная емкость | л/п.м | 2,5 |
| Удельная масса профиля | кг/п.м | 8,6 |
| Удельная масса профиля с водой | кг/п.м | 11,1 |
| Подключение | дюйм | 2 |
| Максимальное рабочее давление (испытательное давление) | бар | 6,5 (10) |
| Максимальная рабочая температура теплоносителя | °C | 150 |

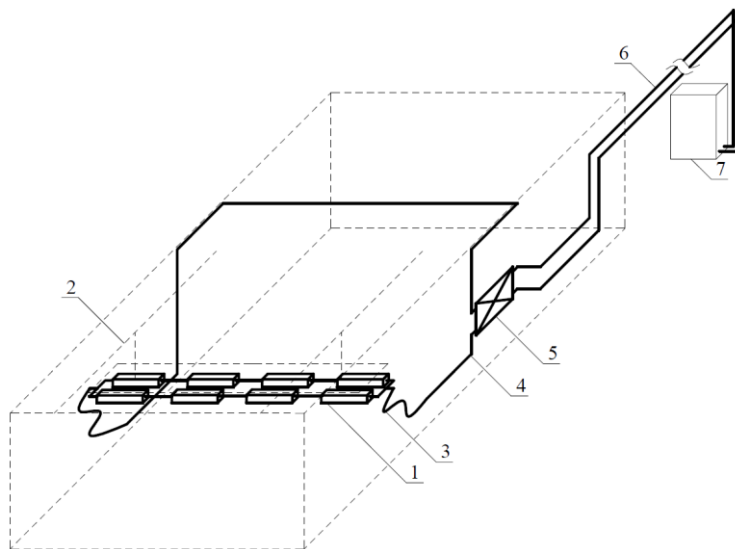


Рис. 2. Схема лабораторной установки: 1 – испытуемые образцы профилей; 2 – передвижная система подвеса; 3 – гибкая подводка; 4 – транзитные трубопроводы; 5 – узел регулирования; 6 – транзитные трубопроводы от холодильной машины; 7 – холодильная машина (чиллер)



В ходе проведения испытаний замерялись и вычислялись математически следующие величины:

T_1 – температура теплоносителя в подающем трубопроводе, °С;

T_2 – температура теплоносителя в обратном трубопроводе, °С;

G_1 – массовый расход теплоносителя в подающем трубопроводе, кг/ч;

G_2 – массовый расход теплоносителя в обратном трубопроводе кг/ч;

N – количество включенных излучателей, шт.;

$Q_{тр}$ – транзитные тепловые потери, Вт, измеренные экспериментально;

$Q_{общ}$ – общее количество поглощенной лабораторной установкой теплоты,

Вт;

ΔT – температурный напор, °С, определяемый по формуле (1):

$$\Delta T = \frac{T_1 + T_2}{2} - t_v; \quad (1)$$

t_v – температура внутреннего воздуха, °С.

Для вычисления удельной мощности 1 п. м излучателя в лабораторных условиях использовалось следующее уравнение:

$$q_{изл} = \frac{\left(\frac{G_1 \cdot c_{T_1} \cdot T_1}{3600} - \frac{G_2 \cdot c_{T_2} \cdot T_2}{3600} - Q_{тр} \right)}{N}, \text{ Вт/п.м.}, \quad (2)$$

где c_{T_1} и c_{T_2} – теплоемкость воды в подающем и обратном трубопроводе, соответственно, Дж/(кг·°С).

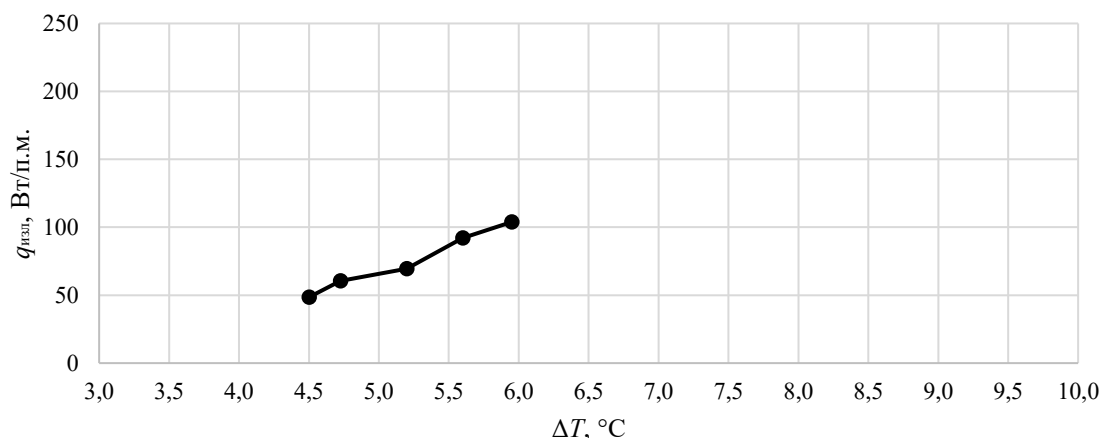
Результаты исследований

Результаты проведенных экспериментальных исследований по определению удельной тепловой мощности 1 п. м профиля *Flower 225* после проведения математической обработки приведены в табл. 2 и на рис. 3.

Таблица 2

Полученные экспериментальные данные для определения удельной тепловой мощности профиля *Flower 225*

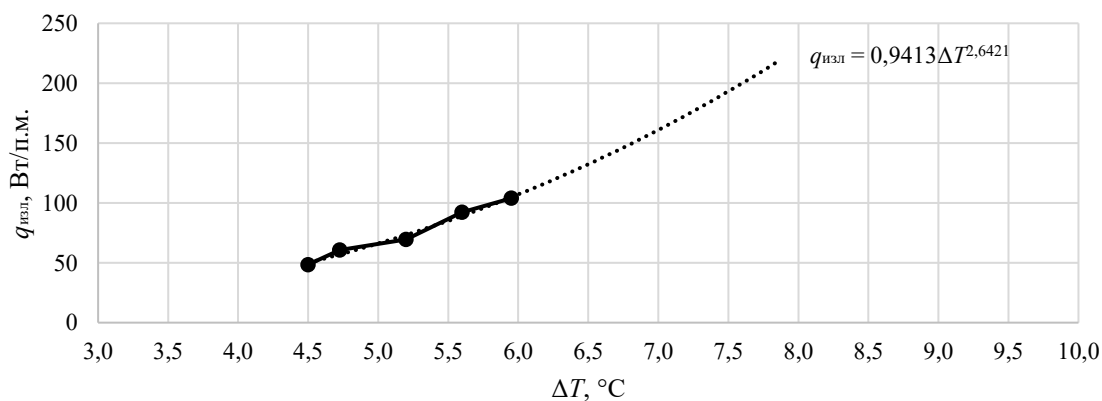
| № опыта п/п | N , шт | T_1 , °С | T_2 , °С | G_1 , кг/ч | G_2 , кг/ч | c_{T_1} , Дж/кг·°С | c_{T_2} , Дж/кг·°С | $Q_{общ}$, Вт | $Q_{тр}$, Вт | $q_{изл}$, Вт/п.м | t_v , °С | ΔT , °С |
|-------------|----------|------------|------------|--------------|--------------|----------------------|----------------------|----------------|---------------|--------------------|------------|-----------------|
| 1 | 6 | 18,1 | 18,5 | 537,20 | 539,17 | 4183,9 | 4183,5 | -61,92 | 13,44 | -48,48 | 22,8 | -4,50 |
| 2 | 6 | 18,2 | 18,8 | 532,00 | 533,15 | 4183,8 | 4183,2 | -74,69 | 14,08 | -60,61 | 23,2 | -4,73 |
| 3 | 6 | 18,4 | 19,0 | 539,17 | 541,12 | 4183,6 | 4183,0 | -85,22 | 15,68 | -69,54 | 23,9 | -5,20 |
| 4 | 6 | 18,4 | 19,2 | 551,16 | 553,09 | 4183,6 | 4182,8 | -109,15 | 16,96 | -92,19 | 24,4 | -5,60 |
| 5 | 6 | 18,4 | 19,3 | 557,15 | 559,07 | 4183,6 | 4182,7 | -121,77 | 17,92 | -103,85 | 24,8 | -5,95 |

Рис. 3. Результаты экспериментальных испытаний профиля *Flower 225*

Для определения зависимости удельной тепловой мощности охлаждающего профиля при различном температурном напоре $\Delta T, ^\circ\text{C}$, требуется установить численное значение a и m для эмпирического уравнения:

$$q_{\text{изл}} = a \cdot \Delta T^m. \quad (3)$$

В дальнейшем была проведена дополнительная математическая обработка для построения зависимости на основе полученных экспериментальных данных. Определение показателей a и m для эмпирического уравнения осуществлялось путем моделирования линии тренда в программном комплексе *MathCAD*, результаты которого приведены на рис. 4.

Рис. 4. Результаты моделирования степенной линии тренда в программном комплексе *MathCAD* для охлаждающего профиля *Flower 225*

В результате математической обработки уравнение (3), для нашего расчетного случая будет иметь вид:

$$q_{\text{изл}} = 0,9413 \cdot \Delta T^{2,6421}. \quad (4)$$

Закключение

Полученные экспериментальные данные и теплофизические зависимости позволяют корректно и достоверно определить удельную тепловую мощность



профилей *Flower 225* для систем радиационного охлаждения в теплый период года.

Высокой энергоэффективности от применения радиационных систем охлаждения можно добиться за счет следующих критериев:

- их применение позволяет уменьшить температурный градиент по высоте помещения и, как следствие, обеспечить более равномерное распределение температур по помещению;

- позволяет поддерживать более высокую температуру в рабочей зоне помещения за счет более низкой радиационной температуры, что позволяет снизить тепловой поток от внешней окружающей среды;

- меньшая тепловая инерция позволяет быстрее реагировать на изменение температуры наружного воздуха и на изменение интенсивности солнечной радиации.

В дальнейшем планируется продолжение исследований температурного режима помещений, оборудованных системами радиационного охлаждения, а также применение их в круглогодичном цикле эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Российская Федерация. Президент. О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации : указ Президента Российской Федерации от 28.02.2024 № 145. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный.
2. Колпаков, Г. В. Регулирование микроклимата в условиях летнего перегрева зданий / Г. В. Колпаков. – Москва : Стройиздат, 1970. – 175 с.
3. Исследование теплотехнических характеристик водяных инфракрасных излучателей для энергоэффективных систем лучистого отопления / М. В. Бодров, Д. А. Кузнецов, А. А. Смыков, А. Е. Руин // Академия. Архитектура и строительство. – 2023, № 2. – С. 160–167.
4. Смыков, А. А. Испытания лабораторной модели лучистой системы отопления на базе водяных инфракрасных излучателей / М. В. Бодров, А. А. Смыков // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2023. – № 3. – С. 40–41.
5. Бодров, М. В. Повышение энергоэффективности производственных зданий за счет применения лучистых систем отопления на базе водяных инфракрасных излучателей / М. В. Бодров, А. А. Смыков, А. Е. Руин // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2022. – № 8. – С. 26–30.
6. Shikha, A. A. Radiant cooling systems for high performance buildings / A. A. Shikha // Journal of international academic research for multidisciplinary. – 2015. – Vol. 3. – P. 126–133.
7. Ziarani, N. N. Anticipating an efficient relative humidity in a room under direct solar radiation and equipped by radiant cooling panel system / N. N. Ziarani, A. P. Haghighi // International Journal of Refrigeration. – 2019. – Vol. 98. – P. 98–108. – DOI 10.1016/j.ijrefrig.2018.10.018.
8. The effect of mineral micro particle in coating on energy consumption reduction and thermal comfort in a room with a radiation cooling panel in different climates / Sheikhzadeh G. A., Azemati A. A., Khorasanizadeh H. [et al.] // Energy and Buildings. – 2014. – Vol. 82. – P. 644–650. – DOI 10.1016/j.enbuild.2014.07.043.
9. Zhang, H. Methodology research on solving non-steady state radiation heat transfer in the room with Ceiling Radiant Cooling Panels / H. Zhang, N. Li, L. Su // International Journal of Refrigeration. – 2015. – Vol. 58. – P. 110–120. – DOI 10.1016/j.ijrefrig.2015.06.009.
10. Karadog, R. New approach relevant to total heat transfer coefficient including the effect of radiation and convection at the ceiling in a cooled ceiling room / R. Karadog // Applied



Thermal Engineering. – 2009. – Vol. 29. – P. 1561–1565. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2008.07.005.

BODROV Mikhail Valerevich, doctor of technical sciences, professor, holder of the chair of heating and ventilation; RUIN Aleksey Evgenievich, assistant of the chair of heating and ventilation; SMYKOV Aleksandr Anatolevich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of heating and ventilation; ELIZAROV Aleksandr Dmitrievich, master degree student of the chair of heating and ventilation

INVESTIGATION OF THERMAL CHARACTERISTICS OF PROFILES IN RADIANT COOLING SYSTEMS

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (831) 430-54-92; e-mail: tes84@inbox.ru

Key words: water cooling, thermophysics, energy saving, energy efficiency, radiant cooling.

The article presents the results of experimental studies of Flower 225 aluminum profiles used in low-temperature radiant cooling systems. The main results of the experimental study of the thermal characteristics of the profiles under investigation, as well as the mathematical dependencies of the cooling profile's capacity on the temperature difference, are presented. correlations for their cooling capacity as a function of the temperature difference. The authors have developed methodological recommendations for calculating radiation cooling systems based on water cooling profiles.

REFERENCES

1. Rossiyskaya Federatsiya. Prezident. O Strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii [On the Strategy of Scientific and Technological Development of the Russian Federation] : ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 28.02.2024 № 145 [Decree of the President of the Russian Federation dated February 28, 2024 No. 145]. URL: <http://www.consultant.ru>.
2. Kolpakov G. V. Regulirovanie mikroklimata v usloviyakh letnego peregreva zdaniy [Microclimate control in conditions of summer overheating of buildings]. Moscow, Stroyizdat, 1970, 175 p.
3. Bodrov M. V., Kuznetsov D. A., Smykov A. A., Ruin A. E. Issledovanie teploekhnicheskikh kharakteristik vodyanykh infrakrasnykh izluchateley dlya energoeffektivnykh sistem luchistogo otopeniya [Investigation of the thermal characteristics of water infrared emitters for energy-efficient radiant heating systems]. Akademiya. Arkhitektura i stroitelstvo [Academy. Architecture and Construction]. Moscow, 2023, № 2, P. 160–167.
4. Smykov A. A., Bodrov M. V. Ispytaniya laboratornoy modeli luchistoy sistemy otopeniya na baze vodyanykh infrakrasnykh izluchateley [Testing of a laboratory model of a radiant heating system based on water infrared emitters]. Santekhnika, Otoplenie, Konditsionirovanie [Sanitary Engineering, Heating, Air Conditioning]. Moscow, 2023, № 3, P. 40–41.
5. Bodrov M. V., Smykov A. A., Ruin A. E. Povyshenie energoeffektivnosti proizvodstvennykh zdaniy za schet primeneniya luchistyykh sistem otopeniya na baze vodyanykh infrakrasnykh izluchateley [Increasing the energy efficiency of industrial buildings through the use of radiant heating systems based on water infrared emitters]. Ventilyatsiya,



otoplenie, konditsionirovanie vozdukha, teplosnabzhenie i stroitelnaya teplofizika [Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics]. Moscow, 2022, № 8, P. 26–30.

6. Shikha A. A. Radiant cooling systems for high performance buildings. Journal of international academic research for multidisciplinary. 2015, Vol. 3, P. 126–133.

7. Ziarani N. N., Haghighi A. P. Anticipating an efficient relative humidity in a room under direct solar radiation and equipped by radiant cooling panel system. International Journal of Refrigeration. 2019, Vol. 98, P. 98–108. DOI 10.1016/j.ijrefrig.2018.10.018.

8. Sheikhzadeh G. A., Azemati A. A., Khorasanizadeh H. [et al.] The effect of mineral micro particle in coating on energy consumption reduction and thermal comfort in a room with a radiation cooling panel in different climates. Energy and Buildings. 2014, Vol. 82, P. 644–650. DOI 10.1016/j.enbuild.2014.07.043.

9. Zhang, H., Li N., Su L. Methodology research on solving non-steady state radiation heat transfer in the room with Ceiling Radiant Cooling Panels. International Journal of Refrigeration. 2015, Vol. 58, P. 110–120. DOI 10.1016/j.ijrefrig.2015.06.009.

10. Karadog R. New approach relevant to total heat transfer coefficient including the effect of radiation and convection at the ceiling in a cooled ceiling room. Applied Thermal Engineering. 2009, Vol. 29, P. 1561–1565. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2008.07.005.

© **М. В. Бодров, А. Е. Руин, А. А. Смыков, А. Д. Елизаров, 2026**

Получено: 17.03.2026 г.



УДК 536.24

Е. С. ЛАПИН¹, канд. техн. наук, доц. кафедры теплоэнергетических систем;
А. П. ЛЕВЦЕВ¹, д-р техн. наук, проф. кафедры теплоэнергетических систем;
Е. С. СЕРГУШИНА¹, зам. директора по учебной работе многопрофильного колледжа;
С. А. ПАНФИЛОВ¹, д-р техн. наук, проф. кафедры электроники и электротехники;
О. В. КАБАНОВ¹, канд. техн. наук, доц. кафедры электроники и электротехники;
А. Ю. КАШУРКИН, заведующий лабораторией², ст. преп.³; **С. М. УСИКОВ**, науч. сотрудник², к.т.н., доц.³

ВЛИЯНИЕ КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ПОТОКА НА ТЕПЛООБМЕН

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва» (НИ МГУ им Н. П. Огарева).

Россия, 430005, Республика Мордовия, Саранск, Большевицкая улица, д. 68/1.

Тел.: (8342) 24-37-32; эл. почта: mrsu@mrsu.ru

²ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН).

Россия, 127238, г. Москва, Локомотивный пр., д. 21.

Тел.: (495) 482-40-76; эл. почта: leontiii@mail.ru; usikov-work@yandex.ru

³ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ).

Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Эл. почта: leontiii@mail.ru; usikov-work@yandex.ru

Ключевые слова: теплообмен, пульсирующее течение, коэффициент теплопередачи, колебательный режим, кожухотрубный теплообменник, число Нуссельта, аналогия Рейнольдса, импульсные технологии, гидродинамика.

В представленной работе исследуется влияние пульсирующего течения жидкости на эффективность теплопередачи в различных типах теплообменных аппаратов. На основе анализа монографии Б. М. Галицкой и экспериментальных данных Р. Кейла установлено, что переход от стационарного к колебательному режиму течения способствует увеличению коэффициента теплоотдачи. Проведены экспериментальные исследования на кожухотрубных и пластинчатых теплообменниках, а также в системе «труба в трубе». Результаты показывают, что при определенных частотах колебаний (0,1–2 Гц) и амплитудах скорости коэффициент теплопередачи возрастает до 1,8 раза. Максимальный прирост эффективности (до 30 %) наблюдается в пластинчатых теплообменниках, однако отмечается значительный разброс данных в импульсном режиме. Рассмотрены перспективные схемы применения импульсных технологий в системах теплоснабжения. Выявлены ограничения, связанные с гидравлическими потерями и сложностью конструкции, что требует дальнейшего совершенствования оборудования [1, 2].

Актуальность исследований в области интенсификации процессов теплопередачи обусловлена постоянно растущими требованиями к энергоэффективности промышленного оборудования и систем жизнеобеспечения [3]. Одним из перспективных направлений является использование управляемых гидродинамических возмущений, в частности, пульсирующего течения теплоносителя. Несмотря на то, что явление влияния пульсаций на теплообмен известно уже несколько десятилетий, его широкое



практическое применение сдерживается отсутствием универсальных инженерных методик расчета и прогнозирования эффекта [4]. Современные вычислительные методы, такие как *CFD*-моделирование, позволяют глубже изучить физику процесса и оптимизировать параметры пульсаций для конкретных типов теплообменных аппаратов [5]. Целью данной работы является систематизация теоретических и экспериментальных данных по влиянию колебательного потока на теплообмен и оценка перспектив применения импульсных технологий в теплоэнергетике.

В монографии Б. М. Галицейского представлен детальный сравнительный анализ теплопередачи при стационарном и пульсирующем течении жидкостей. Результаты исследования демонстрируют, что переход к колебательному режиму в значительной степени способствует росту относительного коэффициента теплоотдачи. Это явление обусловлено формированием поперечных течений и вихревых структур в потоке теплоносителя, при этом ключевую роль играет толщина колеблющегося пограничного слоя:

$$\delta_K = \left(\frac{2\nu}{\omega} \right)^{0,5}, \quad (1)$$

где δ – толщина колеблющегося пограничного слоя, м;

ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

ω – круговая частота колебаний, рад/с.

Колебательное течение с образованием стоячих волн представляет значительный интерес для изучения процессов теплопередачи. В таких условиях наблюдается выраженная пространственная неравномерность распределения интенсивности теплообмена по длине канала [6]. Анализ экспериментальных данных проводимых исследований показывает, что пиковые значения коэффициента теплопередачи соответствуют зонам максимальных колебаний (пучностям), в то время как минимальные показатели фиксируются в узловых точках – это полностью соответствует теоретическим представлениям о динамике стоячих волн [7].

Для количественной оценки процесса теплопередачи используется следующее критериальное уравнение относительного коэффициента:

$$K = \frac{Nu}{Nu_0} = f \left(\frac{\delta_K}{\delta_0}, Re, M, \frac{T_w}{T_f}, \frac{\Delta u_0}{u_0} \right), \quad (2)$$

где Nu – число Нуссельта при наличии колебаний;

Nu_0 – число Нуссельта при стационарном течении;

δ_0 – толщина стационарного слоя, м;

Re – критерий Рейнольдса;

M – число Маха;

T_w – период колебаний для поверхности теплообмена, с;

T_f – средний период колебаний потока, с;

$\frac{\Delta u_0}{u_0}$ – относительная амплитуда колебаний скорости.

Современные исследования показывают, что механизм интенсификации теплообмена при пульсациях существенно зависит от режима течения [8]. В ламинарном потоке пульсации вызывают устойчивую конвекцию, способствующую выравниванию температуры и уменьшению термического

сопротивления. В турбулентном режиме основную роль играет взаимодействие пульсаций с турбулентной структурой потока, что может как усиливать, так и ослаблять турбулентность в пристенной области в зависимости от частоты и амплитуды.

Экспериментальные исследования, проведенные Б. М. Галицейским и Р. Кейлом, содержат ценные данные о воздействии низкочастотных вибраций на интенсивность теплообмена. В качестве объекта исследования использовался кожухотрубный теплообменник со следующими техническими характеристиками:

- длина трубного пучка – 940 мм;
- количество теплообменных труб – 36;
- внутренний диаметр труб – 13,5 мм.

Испытания выполнялись при температуре воды 17°C с применением пара в качестве нагревающей среды. Число Рейнольдса варьировалось от $2,9 \cdot 10^3$ до $17,5 \cdot 10^3$, частота колебаний – от 0,4 до 1,1 Гц.

Проведенные измерения выявили закономерность: относительный коэффициент теплопередачи K демонстрирует устойчивый рост при увеличении амплитуды колебаний скорости в диапазоне от 1 до 4 для всех исследуемых режимов течения (ламинарного, переходного и развитого турбулентного). Наиболее существенное влияние температурных параметров греющего пара отмечается в ламинарном режиме, где наблюдается максимальный прирост эффективности теплообмена [9].

В проводимых нами исследованиях также исследован теплообменник типа «труба в трубе» (внутренний диаметр 51 мм, длина 0,60 м) с пульсирующим потоком воды, создаваемым поршневым насосом. Максимальный нагрев воды составлял T °C, частота колебаний – f Гц. При амплитуде колебаний $A = \frac{\Delta u_0}{u_0}$ и числе Рейнольдса Re зафиксировано увеличение коэффициента теплоотдачи до K % (рис. 1). Полученные данные хорошо согласуются с результатами других авторов, которые также отмечают наличие оптимальной частоты пульсаций, при которой эффект интенсификации максимален [10].

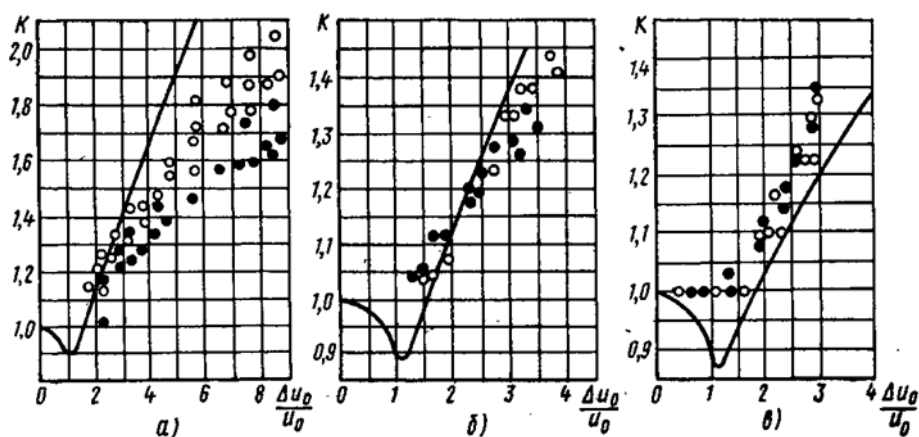


Рис. 1. Зависимость относительного коэффициента теплоотдачи от амплитуды колебаний скорости при различных частотах: а) ω_1, f_1 Гц; б) ω_2, f_2 Гц; в) ω_3, f_3 Гц;
● – давление пара 1,62 кгс/см²; ○ – давление пара 1,125 кгс/см²



Для моделирования процессов в кожухотрубных теплообменниках применена аналогия Рейнольдса, предполагающая постоянство скорости и температуры в поперечном сечении потока. Тепловой поток рассчитывался по формуле:

$$\dot{m} = \frac{\sum m_i}{Ft}, \quad (3)$$

где m – плотность потока массы, кг;

F – площадь поверхности теплообмена, м²;

t – расчетный период времени, с.

Число Стентона, выражающее аналогию Рейнольдса:

$$St = \frac{C_f}{2}, \quad (4)$$

где C_f – коэффициент трения.

Коэффициент теплоотдачи определяется как:

$$St = \frac{\alpha}{c_r \rho \omega_\infty}. \quad (5)$$

При этом коэффициент трения рассчитывается по формуле:

$$\tau_\infty = C_f \frac{\rho \omega_\infty^2}{2}. \quad (6)$$

Экспериментальные данные показывают увеличение коэффициента теплоотдачи до 1,8 раза при частоте 0,1–2 Гц. Максимальный экспериментальный прирост составил 14 % при $\omega=10$ рад/с (рис. 2).

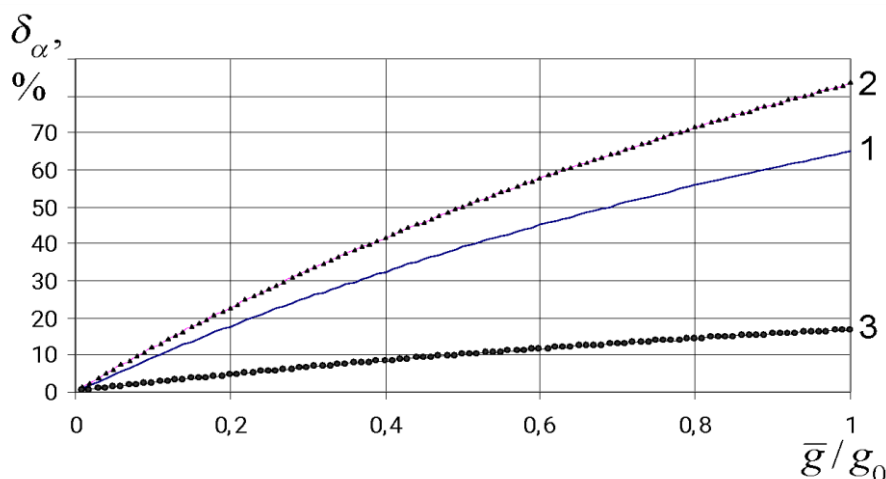


Рис. 2. Зависимость приращения коэффициента теплоотдачи от амплитуды колебаний: 1 – 10 рад/с (эксперимент); 2 – 12 рад/с; 3 – 4 рад/с

Исследования демонстрируют возможность повышения коэффициента теплопередачи на 20 % в кожухотрубных теплообменниках ГВС при использовании специального ударного клапана [11]. Однако значительные гидравлические потери ограничивают применение таких систем случаями с избыточным располагаемым напором. Следует отметить, что гидравлическое сопротивление при пульсирующем течении может в 1,5–2 раза превышать

сопротивление при стационарном режиме с тем же средним расходом, что является существенным недостатком технологии [12].

В пластинчатых теплообменниках достигнуто увеличение коэффициента теплопередачи до 30 %, хотя отмечался значительный разброс данных в импульсном режиме [13]. Эффективность системы снижается при уменьшении расхода нагреваемого теплоносителя. Высокая эффективность в пластинчатых аппаратах объясняется сложной геометрией каналов, которая способствует генерации вторичных течений и более интенсивному разрушению пограничного слоя под действием пульсаций.

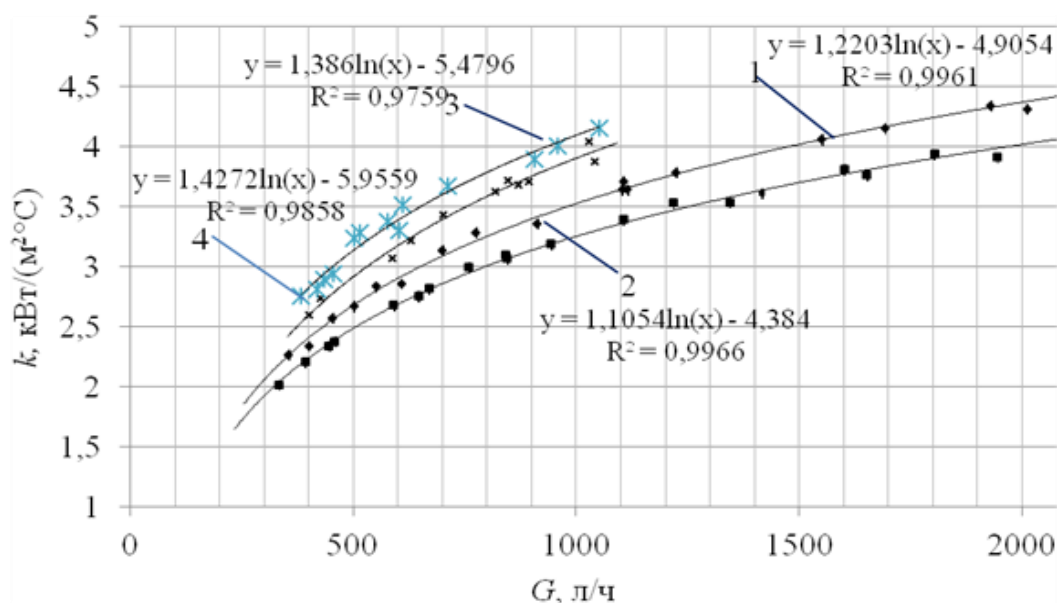


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопередачи от расхода греющего теплоносителя:
1, 2 – стационарный режим (70 °C и 50 °C соответственно);
3, 4 – импульсный режим (70 °C и 50 °C соответственно)

Проведенный мета-анализ данных из различных источников позволяет сделать вывод о том, что эффективность импульсной технологии сильно зависит от геометрии канала. Наибольший относительный выигрыш наблюдается в каналах с малыми гидравлическими диаметрами и в условиях, близких к ламинарному режиму течения.

Анализ схем ИТП выявил их недостатки, связанные с изменением расхода греющей среды. Перспективные схемы для зависимых систем представлены на рис. 4 и 5, однако их широкое применение ограничивается сложностью конструкции и низкой надежностью импульсных устройств.

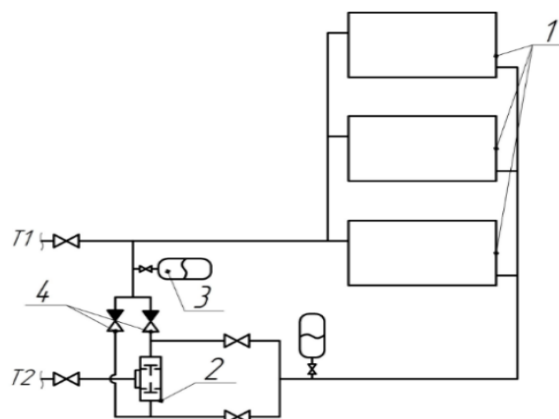


Рис. 4. Схема абонентского ввода с импульсным устройством:

1 – радиаторы; 2 – импульсное устройство; 3 – мембранный бак; 4 – обратный клапан; T1, T2 – трубопроводы.

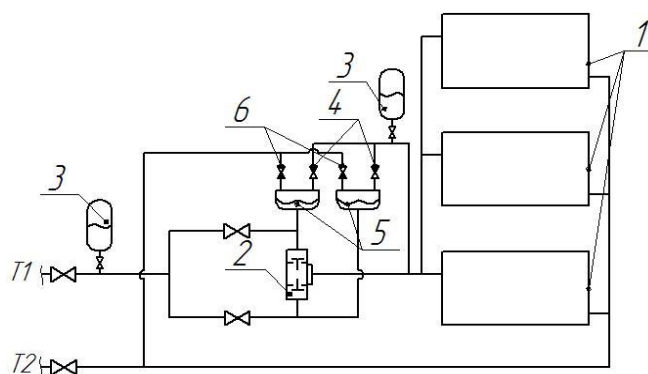


Рис. 5. Схема с импульсным устройством и мембранными насосами:

1 – радиаторы; 2 – импульсное устройство; 3 – бак; 4, 6 – клапаны; 5 – насос; T1, T2 – трубопроводы

К основным техническим проблемам, препятствующим массовому внедрению импульсных технологий, можно отнести: повышенный шум и вибрации, необходимость обеспечения надежности и долговечности импульсных генераторов (клапанов, мембранных насосов), сложность синхронизации работы нескольких устройств в одной системе. Кроме того, энергозатраты на создание пульсаций могут нивелировать выгоду от интенсификации теплообмена, поэтому важной задачей является поиск энергоэффективных способов создания гидравлических возмущений.

Дальнейшее развитие импульсных технологий требует совершенствования конструкций клапанов и расширения области их применения, включая системы индивидуального отопления.

Проведенный анализ подтверждает высокую эффективность использования пульсирующего потока для интенсификации теплообмена в различных типах теплообменных аппаратов. Установлено, что коэффициент теплопередачи может быть увеличен до 1,8 раза в кожухотрубных теплообменниках и до 30 % в пластинчатых при оптимальных частотах (0,1–2 Гц) и амплитудах колебаний. Однако широкое практическое применение импульсных технологий сдерживается



рядом факторов, главными из которых являются значительное увеличение гидравлического сопротивления, сложность и низкая надежность оборудования для создания пульсаций, а также недостаточная изученность влияния пульсаций на долговечность теплообменных аппаратов.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются: разработка энергоэффективных импульсных устройств с адаптивным управлением параметрами пульсаций; проведение комплексных исследований влияния пульсаций на процессы теплообмена в двухфазных потоках; создание универсальных инженерных методик расчета теплообменников, работающих в импульсном режиме.

Дальнейшее развитие импульсных технологий требует совершенствования конструкций клапанов и расширения области их применения, включая системы индивидуального отопления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент № 2716545 С1 Российская Федерация, МПК F24D 3/00, F24D 17/00. Система теплоснабжения и способ организации ее работы : № 2019131243 : заявл. 03.10.2019 : опубл. 12.03.2020 / А. П. Левцев, Е. С. Лапин, А. А. Голянин [и др.] ; заявитель Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва.
2. Патент № 2754569 С1 Российская Федерация, МПК F24D 3/02. Система отопления здания независимого присоединения с организацией в ней пульсирующего режима движения теплоносителя : № 2020134571 : заявл. 21.10.2020 : опубл. 03.09.2021 / А. П. Левцев, А. А. Голянин, Е. С. Лапин ; заявитель Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва.
3. Патент № 2746638 С1 Российская Федерация, МПК F24D 3/02. Система отопления здания зависимого присоединения с организацией в ней пульсирующего режима движения теплоносителя : № 2020133525 : заявл. 13.10.2020 : опубл. 19.04.2021 / А. П. Левцев, Е. С. Лапин, А. А. Голянин, Р. В. Панкратьев ; заявитель Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва.
4. Термическое сопротивление наружных ограждающих конструкций при переменном тепловом потоке / В. Т. Ерофеев, Т. Ф. Ельчищева, А. П. Левцев [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. – 2022. – № 10. – С. 4–13. – DOI 10.33622/0869-7019.2022.10.04-13.
5. Панфилов, С. А. Метод исследования параметров теплового режима помещения здания для настройки энергоэффективной системы отопления / С. А. Панфилов, О. В. Кабанов, В. Т. Ерофеев // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году : сборник научных трудов / Российская академия архитектуры и строительных наук. – Москва : АСВ, 2022. – Том 2. – С. 310–320.
6. Патент № 2781893 С1 Российская Федерация, МПК F24D 15/00, G05D 23/00. Способ определения минимального времени включения системы отопления на нагрев помещения здания : № 2021135973 : заявл. 07.12.2021 : опубл. 19.10.2022 / О. В. Кабанов, С. А. Панфилов ; заявитель Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617121 Российская Федерация. Программа адаптивного управления тепловым режимом помещения здания : № 2022615826 : заявл. 06.04.2022 : опубл. 18.04.2022 / О. В. Кабанов, С. А. Панфилов ; заявитель Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва.



8. Кабанов, О. В. Совершенствование режимов подачи энергоносителя в системах автономного отопления производственных помещений зданий : специальность 2.1.3 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кабанов Олег Владимирович ; Волгоградский государственный технический университет. – Волгоград, 2022. – 169 с.

9. Конструктивные особенности и оценка работы оборудования для импульсной подачи теплоносителя / А. П. Левцев, Е. С. Лапин, М. В. Бикунова, В. В. Салмин // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 4 (37). – С. 151–158.

10. Кашуркин, А. Ю. Оптимизация конструкции горизонтальных систем водяного отопления с этажными станциями / А. Ю. Кашуркин, С. М. Усиков // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 12. – С. 381–386.

11. Панфилов, С. А. Устройство для энергосберегающего управления отоплением автономного помещения здания / С. А. Панфилов, В. Т. Ерофеев, О. В. Кабанов // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году : сборник научных трудов / Российская академия архитектуры и строительных наук. – Москва : АСВ, 2022. – Том 2. – С. 300–309.

12. Лапин, Е. С. Разработка пульсирующих режимов подачи теплоносителя в системах отопления зданий с секционными радиаторами : специальность 2.1.3 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лапин Евгений Евгеньевич ; [Место защиты : Волгоградский государственный технический университет]. – Волгоград, 2023. – 152 с. : ил.

13. Measuring the thermo physical properties of construction projects / O. V. Kabanov, S. A. Panfilov, A. A. Prokin, E. S. Sergushina // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. – 2019. – Vol. 16, № 7. – P. 3121–3127. – DOI 10.1166/jctn.2019.8229.

LAPIN Evgeniy Sergeevich¹, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of thermal power systems; LEVTSEV Aleksey Pavlovich¹, doctor of technical sciences, professor of the chair of thermal power systems; SERGUSHINA Elena Sergeevna¹, deputy director of academic affairs of the multidisciplinary college; PANFILOV Stepan Aleksandrovich¹, doctor of technical sciences, professor of the chair of electronics and electrical engineering; KABANOV Oleg Vladimirovich¹, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of electronics and electrical engineering; KASHURKIN Aleksey Yuryevich, head of the Laboratory², senior teacher³; USIKOV Sergey Mikhailovich, researcher², candidate of technical sciences, associate professor³

EFFECT OF OSCILLATING FLOW ON HEAT TRANSFER

¹National Research Ogarev Mordovia State University.
68/1, Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russia.
Tel.: (8342) 24-37-32; e-mail: mrsu@mrsu.ru

²Scientific Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Constructions Sciences (RAACS).
21, Lokomotivny Proezd, Moscow, 127238, Russia.
Tel.: (495) 482-40-76; e-mail: niisf@niisf.ru

³Moscow State University of Civil Engineering.
26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russia.
E-mail: leontiii@mail.ru; usikov-work@yandex.ru

Key words: heat transfer, pulsating flow, heat transfer coefficient, oscillatory mode, shell-and-tube heat exchanger, Nusselt number, Reynolds analogy, pulse technologies, hydrodynamics.



The presented work studies the effect of pulsating fluid flow on the efficiency of heat transfer in various types of heat exchangers. Based on the analysis of B. M. Galitsensky's monograph and R. Keil's experimental data, it was established that the transition from a stationary to a pulsating flow regime increases the heat transfer coefficient. Experimental studies were conducted on shell-and-tube and plate heat exchangers, as well as in a pipe-in-pipe system. The results show that at certain oscillation frequencies (0,1–2 Hz) and velocity amplitudes, the heat transfer coefficient increases by up to 1,8 times. The maximum increase in efficiency (up to 30 %) is observed in plate heat exchangers, but there is a significant variation in data in the pulse mode. Promising schemes for using pulse technologies in heating systems are discussed. The limitations associated with hydraulic losses and design complexity have been identified, which requires further improvement of the equipment [1, 2].

REFERENCES

1. Patent № 2716545 C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F24D 3/00, F24D 17/00. Sistema teplosnabzheniya i sposob organizatsii ee raboty [Heat supply system and method of organizing its operation] : № 2019131243 : zayavl. 03.10.2019 : opubl. 12.03.2020 / A. P. Levcev, E. S. Laping, A. A. Golyanin [et al.] ; Natsionalny issledovatel'skiy Mordovskiy gosudarstvennyy universitet im. N. P. Ogareva.
2. Patent № 2754569 C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F24D 3/02. Sistema otopeniya zdaniya nezavisimogo prisoedineniya s organizatsiyey v ney pulsiruyushchego rezhima dvizheniya teplonositelya [Building heating system of independent connection with the organization of a pulsating mode of heat carrier movement in it] : № 2020134571 : zayavl. 21.10.2020 : opubl. 03.09.2021 / A. P. Levcev, A. A. Golyanin, E. S. Laping ; Natsionalny issledovatel'skiy Mordovskiy gosudarstvennyy universitet im. N. P. Ogareva.
3. Patent № 2746638 C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F24D 3/02. Sistema otopeniya zdaniya zavisimogo prisoedineniya s organizatsiyey v ney pulsiruyushchego rezhima dvizheniya teplonositelya [Building heating system of dependent connection with the organization of a pulsating mode of heat carrier movement in it] : № 2020133525 : zayavl. 13.10.2020 : opubl. 19.04.2021 / A. P. Levcev, E. S. Laping, A. A. Golyanin, R. V. Pankratev ; Natsionalny issledovatel'skiy Mordovskiy gosudarstvennyy universitet im. N. P. Ogareva.
4. Yerofeyev V. T., Yelchishcheva T. F., Levcev A. P. [et al.]. Termicheskoye soprotivleniye naruzhnykh ograzhdayushchikh konstruktov pri peremennom teplovom potoke [Thermal resistance of external enclosing structures under variable heat flow]. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. Moscow, 2022, № 10, P. 4–13. DOI 10.33622/0869-7019.2022.10.04-13.
5. Panfilov S. A., Kabanov O. V., Yerofeyev V. T. Metod issledovaniya parametrov teplovogo rezhima pomeshcheniya zdaniya dlya nastroyki energoэффективной sistemy otopleiya [Method for studying the parameters of the thermal regime of a building premises for setting up an energy-efficient heating system]. Fundamentalnye, poiskovye i prikladnye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noy otrasli Rossiyskoy Federatsii v 2021 godu [Fundamental, exploratory and applied research of RAACS for scientific support of the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2021]: sbornik nauchnykh trudov. Rossiyskaya akademiya arkhitektury i stroitel'nykh nauk. Moscow, 2022, Vol. 2, P. 310–320.
6. Patent № 2781893 C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F24D 15/00, G05D 23/00. Sposob opredeleniya minimal'nogo vremeni vklyucheniya sistemy otopleiya na nagrev pomeshcheniya zdaniya [Method for determining the minimum turn-on time of the heating system for heating a building premises] : № 2021135973 : zayavl. 07.12.2021 : opubl. 19.10.2022 / O. V. Kabanov, S. A. Panfilov ; Natsionalny issledovatel'skiy Mordovskiy gosudarstvennyy universitet im. N. P. Ogareva.



7. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2022617121 Rossiyskaya Federatsiya [Certificate of state registration of a computer program No. 2022617121 Russian Federation]. Programma adaptivnogo upravleniya teplovym rezhimom pomeshcheniya zdaniya [Program for adaptive control of the thermal regime of a building premises] : № 2022615826 : zayavl. 06.04.2022 : opubl. 18.04.2022 / O. V. Kabanov, S. A. Panfilov ; Natsionalny issledovatel'skiy Mordovskiy gosudarstvenny universitet im. N. P. Ogareva.

8. Kabanov O. V. Sovershenstvovaniye rezhimov podachi energonositelya v sistemakh avtonomnogo otopleya proizvodstvennykh pomeshcheniy zdaniy [Improvement of energy carrier supply modes in autonomous heating systems of industrial premises of buildings] : spetsialnost 2.1.3 : diss. ... kand. tekhn. nauk ; Volgogradskiy gosudarstvenny tekhnicheskii universitet. Volgograd, 2022, 169 p.

9. Levcev A. P., Lapin E. S., Bikunova M. V., Salmin V. V. Konstruktivnye osobennosti i otsenka raboty oborudovaniya dlya impul'snoy podachi teponositelya [Design features and performance evaluation of equipment for pulse supply of heat carrier]. Regionalnaya arkhitektura i stroitel'stvo [Regional Architecture and Construction]. Volgograd, 2018, № 4 (37), P. 151–158.

10. Kashurkin A. Yu., Usikov S. M. Optimizatsiya konstruksii gorizontalnykh sistem vodianogo otopleya s etazhnymi stantsiyami [Optimization of the design of horizontal water heating systems with floor stations]. Innovatsii i investitsii [Innovations and Investments]. Moscow, 2024, № 12, P. 381–386.

11. Panfilov S. A., Yerofeyev V. T., Kabanov O. V. Ustroystvo dlya energosberegayushchego upravleniya otopleyem avtonomnogo pomeshcheniya zdaniya [Device for energy-saving control of heating of an autonomous building premises]. Fundamentalnye, poiskovye i prikladnye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noy otrasli Rossiyskoy Federatsii v 2021 godu [Fundamental, exploratory and applied research of RAACS for scientific support of the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2021]: sbornik nauchnykh trudov. Rossiyskaya akademiya arkhitektury i stroitel'nykh nauk. Moscow, 2022, Vol. 2, P. 300–309.

12. Lapin E. S. Razrabotka pulsiruyushchikh rezhimov podachi teponositelya v sistemakh otopleya zdaniy s sektiionnymi radiatorami [Development of pulsating modes of heat carrier supply in building heating systems with sectional radiators] : spetsialnost 2.1.3 : diss. ... kand. tekhn. nauk ; Volgogradskiy gosudarstvenny tekhnicheskii universitet. Volgograd, 2023, 152 p.

13. Kabanov O. V., Panfilov S. A., Prokin A. A., Sergushina E. S. Measuring the thermo physical properties of construction projects. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. 2019, Vol. 16, № 7, P. 3121–3127. DOI 10.1166/jctn.2019.8229.

© Е. С. Лапин, А. П. Левцев, Е. С. Сергушина, С. А. Панфилов, О. В. Кабанов,
А. Ю. Кашуркин, С. М. Усиков, 2026

Получено: 12.02.2026 г.



УДК 628.162

И. В. СУВОРОВ, аспирант кафедры водопользования и экологии

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ЗАГРУЗКИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРОМЫВНЫХ ВОД СТАНЦИЙ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Тел.: (812) 575-05-34, эл. почта: rector@spbgasu.ru

Ключевые слова: промывные воды, станции обезжелезивания, многокомпонентная загрузка, железо, марганец, фильтрация, перепад давления, водоподготовка.

В статье представлены результаты оценки эффективности многокомпонентной загрузки (МКЗ) при очистке промывных вод станций обезжелезивания подземных вод. Актуальность работы обусловлена образованием значительных объемов промывных вод при эксплуатации станций обезжелезивания и необходимостью разработки локальных ресурсосберегающих технологий их очистки с одновременным вовлечением отходов водоподготовки во вторичное использование.

Введение

Станции обезжелезивания подземных вод широко применяются в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения Республики Беларусь и других стран СНГ. Наиболее распространенной технологической схемой является упрощенная аэрация с последующим фильтрованием на напорных фильтрах с зернистыми нагрузками. Вместе с тем эксплуатация таких сооружений сопровождается образованием значительных объемов промывных вод, содержащих оксиды и гидроксиды железа, соединения марганца, взвешенные минеральные и органические примеси. Объем промывных вод может достигать 10–15 % производительности станции [1–3], что создает дополнительную нагрузку на системы водоотведения и усложняет эксплуатацию объектов водоподготовки.

В работах автора и соавторов рассмотрены современные безреагентные и реагентные методы удаления железа из воды, а также конструктивные и эксплуатационные особенности станций обезжелезивания [1, 2]. Отдельный цикл исследований был посвящен изучению торфа, шлама водоподготовки и совокупности природных и техногенных материалов как потенциальных компонентов фильтрующих загрузок [4–7]. Возможности использования торфа и шлама водоподготовки в технологиях очистки воды, а также вопросы утилизации шламов рассмотрены в работах [3, 6]. Однако для практического внедрения принципиально важно оценить не только свойства отдельных компонентов, но и эффективность их совместного применения в составе многокомпонентной загрузки, работающей как самостоятельная фильтрующая система в условиях, приближенных к реальной эксплуатации.

Результаты предварительных исследований показали, что среди рассмотренных вариантов наибольший интерес представляет МКЗ, включающая природный органический компонент, техногенный железосодержащий компонент



и щелочной компонент. Эффективность такой загрузки обусловлена сочетанием развитой поверхности, способности к сорбционному закреплению гидролизированных железосодержащих фаз и приемлемых гидравлических характеристик фильтрующего слоя.

В связи с этим целью настоящей работы являлась оценка эффективности применения многокомпонентной загрузки для очистки промывных вод станций обезжелезивания по показателям удаления железа, марганца и перепада давления на фильтре. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: проведены сравнительные опытно-промышленные испытания многокомпонентной и стандартных загрузок; оценена динамика изменения концентраций железа и марганца в фильтрате; определено изменение перепада давления в течение фильтроцикла; установлено влияние объема загрузки на эффективность очистки и гидравлическую устойчивость фильтра.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись промывные воды станций обезжелезивания подземных вод [1, 2]. В сравнительной серии опытно-промышленных испытаний использовали реальные промывные воды, образующиеся после регенерации фильтров станции обезжелезивания. Исходные концентрации загрязняющих компонентов составляли: общее железо – 8,2 мг/л, марганец – 0,2 мг/л. Отбор проб фильтрата осуществляли через каждые 30 мин в течение 6 ч. В качестве контролируемых показателей принимали концентрации общего железа, марганца и перепад давления на фильтре Δp .

Испытания проводили на двух параллельных опытных модулях, каждый из которых включал по две идентичные фильтровальные колонны с одинаковыми геометрическими параметрами и дренажно-распределительными системами. Сравнительные испытания выполняли в два этапа, при этом на каждом этапе одновременно работали две колонны. Для всех исследуемых вариантов задавали одинаковый гидравлический режим: диаметр колонны – 0,5 м, высота фильтрующего слоя – 0,9 м, скорость фильтрации – 10 м/ч.

В работе исследовали четыре варианта загрузок. В качестве основного объекта рассматривали МКЗ, состав которой был сформирован на основании предварительных исследований торфа, шлама водоподготовки и совокупности природных и техногенных материалов [4–6]. Для сравнительной оценки использовали также двухслойную загрузку «антрацит + кварцевый песок + гравий», однородную загрузку «кварцевый песок + гравий» и многослойную загрузку «гидроантрацит + MnO_2 + кварцевый песок + гравий».

Дополнительно была выполнена серия испытаний, направленная на оценку влияния объема МКЗ на эффективность очистки и гидравлические характеристики фильтра. Объем слоя определяли как геометрический объем загрузки, рассчитываемый по диаметру колонны и высоте слоя. В опытах рассматривали объемы: 20, 40, 55, 70, 90 и 115 л, соответствующие высоте слоя: 0,10; 0,20; 0,28; 0,36; 0,46 и 0,59 м. В данной серии испытаний использовали промывную воду с исходными концентрациями железа около 1,5 мг/л и марганца около 0,4 мг/л.

Результаты и обсуждение

1. Сравнительная оценка работы МКЗ и стандартных загрузок

Опытно-промышленные испытания показали, что МКЗ является наиболее устойчивым вариантом среди исследованных систем по совокупности

показателей качества очистки и гидравлической устойчивости. При одинаковом режиме фильтрации и использовании промывной воды МКЗ обеспечивала более стабильную работу по железу и марганцу по сравнению с двухслойной загрузкой «антрацит + кварцевый песок + гравий», однородной загрузкой «кварцевый песок + гравий» и многослойной загрузкой «гидроантрацит + MnO_2 + кварцевый песок + гравий».

Высокая эффективность МКЗ по отношению к железу обусловлена формами его нахождения в промывных водах. В исследованных условиях удаление железа связано, прежде всего, с гидролизом Fe(III) , образованием малорастворимых оксигидроксидных фаз, их закреплением на поверхности частиц загрузки и механическим удержанием в межзерновом пространстве слоя. В связи с этим механизм извлечения железа на МКЗ целесообразно характеризовать как гидролитико-сорбционно-фильтрационный [5, 7, 8].

Удаление марганца протекает сложнее. В исследованных условиях основной вклад в снижение концентрации Mn^{2+} вносили сорбционно-ионообменные взаимодействия [7–10], тогда как вклад окислительных превращений был ограниченным. Именно поэтому марганец следует рассматривать как лимитирующий показатель процесса, определяющий продолжительность эффективной работы фильтра.

Для сравнительной оценки были построены три графика: динамика изменения концентрации общего железа, динамика изменения концентрации марганца и изменение перепада давления Δp при фильтрации на четырех вариантах загрузок.

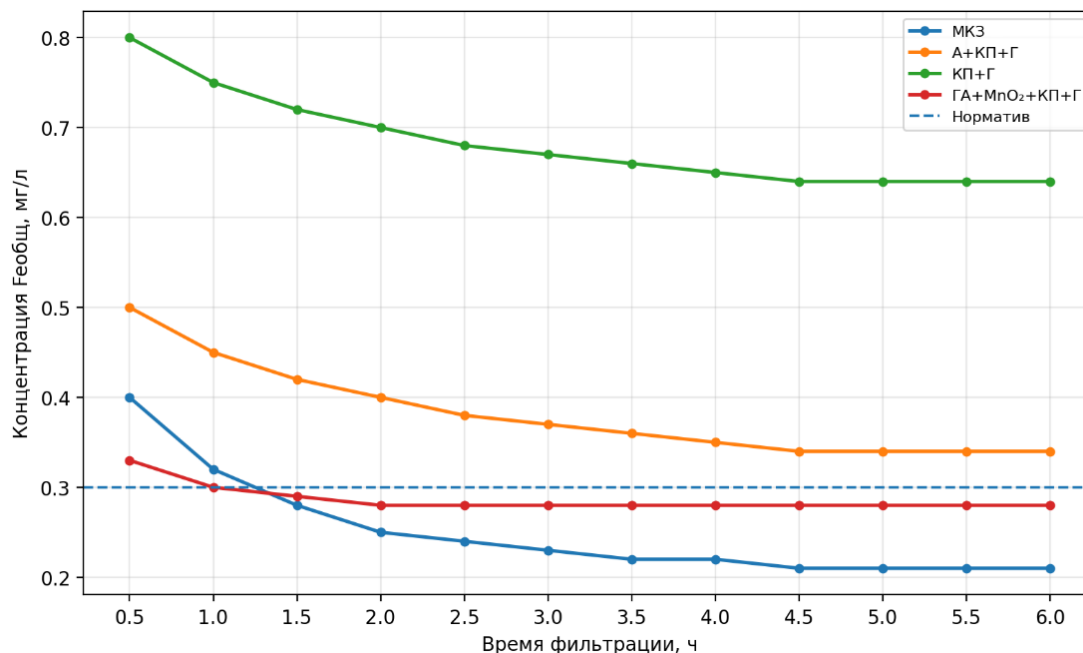


Рис. 1. Динамика изменения концентрации общего железа в фильтрате при использовании МКЗ и стандартных загрузок

Как видно из рис. 1, через 0,5 ч после начала фильтрации концентрация $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в фильтрате составила 0,40 мг/л для МКЗ, 0,50 мг/л для загрузки А+КП+Г,



0,80 мг/л для КП+Г и 0,33 мг/л для загрузки ГА+MnO₂+КП+Г. Уже через 1,5–2,0 ч МКЗ обеспечивала снижение концентрации Fe_{общ} до 0,28–0,25 мг/л, то есть до нормативного уровня не более 0,3 мг/л, после чего показатель стабилизировался в интервале 0,21–0,25 мг/л до конца опыта. Для загрузки ГА+MnO₂+КП+Г значения Fe_{общ} находились в пределах 0,33–0,28 мг/л, то есть норматив достигался, но с меньшим запасом. Двухслойная загрузка А+КП+Г снижала Fe_{общ} до 0,34–0,50 мг/л, а однородная загрузка КП+Г – до 0,64–0,80 мг/л, что не обеспечивало нормативного качества очищенной воды по железу. Таким образом, МКЗ показала наилучший результат по устойчивости удаления железа.

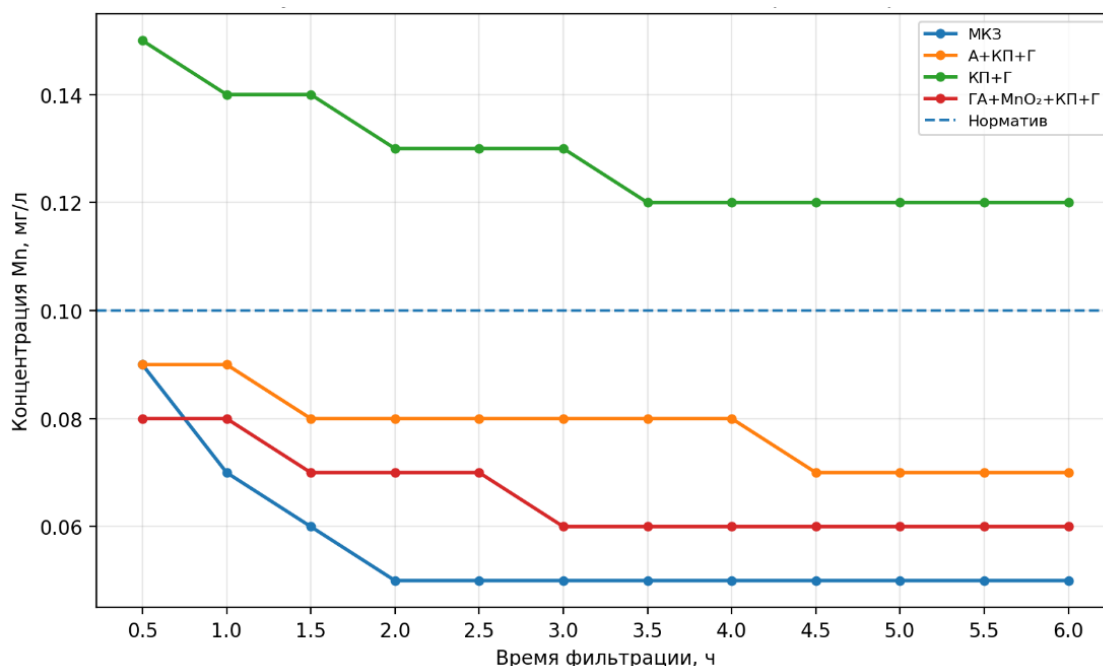


Рис. 2. Динамика изменения концентрации марганца в фильтрате при использовании МКЗ и стандартных загрузок

Как видно из рис. 2, изменение концентрации марганца в фильтрате носило менее контрастный характер, чем по железу. Через 0,5 ч концентрация Mn составила 0,09 мг/л для МКЗ, 0,09 мг/л для А+КП+Г, 0,15 мг/л для КП+Г и 0,08 мг/л для ГА+MnO₂+КП+Г. В дальнейшем МКЗ обеспечивала снижение содержания марганца до 0,05–0,07 мг/л и сохраняла этот уровень на протяжении всего опыта. Загрузка ГА+MnO₂+КП+Г демонстрировала сопоставимые значения – 0,06–0,08 мг/л. Для двухслойной загрузки А+КП+Г концентрация марганца составляла 0,07–0,09 мг/л, а для КП+Г – 0,12–0,15 мг/л. Следовательно, по марганцу наиболее эффективными вариантами оказались МКЗ и ГА+MnO₂+КП+Г, тогда как кварцевый песок без активных компонентов показал наихудшие результаты.

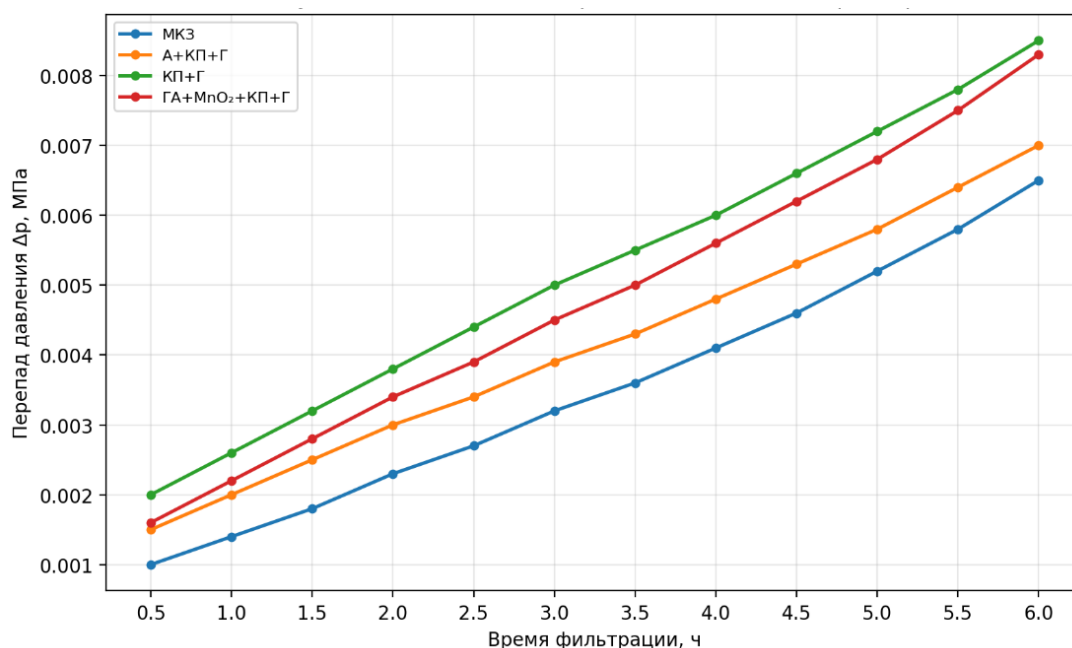


Рис. 3. Изменение перепада давления на фильтре при использовании МКЗ и стандартных нагрузок

Как видно из рис. 3, перепад давления Δp увеличивался для всех исследованных вариантов нагрузок по мере накопления осадка в межзерновом пространстве фильтрующего слоя. Через 0,5 ч величина Δp составляла 0,0010 МПа для МКЗ, 0,0015 МПа для А+КП+Г, 0,0020 МПа для КП+Г и 0,0016 МПа для ГА+MnO₂+КП+Г. К концу 6-часового цикла Δp увеличивался соответственно до 0,0065; 0,0070; 0,0085 и 0,0083 МПа. Наименьший рост гидравлического сопротивления наблюдался у МКЗ, тогда как наибольший – у загрузки КП+Г и многослойной загрузки ГА+MnO₂+КП+Г. Следовательно, МКЗ не только обеспечивала лучшее качество очистки по железу и высокую эффективность по марганцу, но и характеризовалась наиболее благоприятной гидравлической устойчивостью в пределах рассматриваемого фильтроцикла.

2. Влияние объема загрузки на показатели очистки и гидравлическую устойчивость

Результаты опытно-промышленных испытаний при различных объемах фильтрующего слоя подтвердили более высокую эффективность многокомпонентной загрузки по сравнению со стандартной многослойной загрузкой (ГА+MnO₂+КП+Г).

По железу во всем исследованном диапазоне объемов МКЗ обеспечивала практически полное удаление загрязнения: концентрация Fe в фильтрате не превышала 0,02 мг/л, что существенно ниже нормативного значения 0,3 мг/л. Проскока железа в пределах длительности испытаний не наблюдалось. В то же время стандартная многослойная загрузка снижала концентрацию Fe лишь до 0,19–0,25 мг/л, то есть обеспечивала соответствие нормативу по железу с меньшим эксплуатационным запасом.

Для марганца выявлена выраженная зависимость эффективности от объема слоя. При минимальном объеме МКЗ 20 л концентрация Mn в фильтрате



составляла около 0,12 мг/л, что превышало нормативное значение 0,1 мг/л. При увеличении объема до 40–55 л наблюдалось снижение концентрации до 0,05–0,07 мг/л, а при 70–115 л она стабилизировалась на уровне 0,03–0,04 мг/л. Таким образом, нормативное требование по марганцу обеспечивалось, начиная с объема 55 л. Время до «проскока» по марганцу возрастало от 2,5 ч при объеме 20 л до 10–11 ч при объемах 90–115 л, что указывает на прямую зависимость ресурса фильтра от объема загрузки. В отличие от МКЗ, стандартная многослойная загрузка снижала концентрацию Mn только до 0,13–0,18 мг/л и не обеспечивала нормативных требований даже при максимальном объеме слоя.

По гидравлическому сопротивлению различия между МКЗ и стандартной загрузкой были менее выраженными. Для МКЗ перепад давления Δp возрастал от 0,003–0,004 МПа при объемах 20–55 л до 0,008 МПа при объеме 115 л. Для стандартной многослойной загрузки Δp составлял 0,003–0,005 МПа. Таким образом, при несколько меньших гидравлических потерях стандартная загрузка уступала МКЗ по эффективности удаления железа и особенно марганца.

С инженерной точки зрения рациональным является диапазон объемов 55–90 л, при котором обеспечивается соответствие нормативным требованиям по Fe и Mn при умеренном росте перепада давления Δp . Применение стандартной многослойной загрузки в рассматриваемой серии не обеспечило норматив по марганцу, что ограничивает ее использование при повышенных исходных концентрациях Mn.

Таблица 1

Результаты опытно-промышленных испытаний при различных объемах МКЗ и стандартной многослойной загрузки

| Объем загрузки, л | Высота слоя, м | Fe, мг/л | | Mn, мг/л | | Δp , МПа | | Время до «проскока» Fe, ч | | Время до «проскока» Mn, ч |
|-------------------|----------------|----------|------|----------|------|------------------|-------|---------------------------|----|---------------------------|
| | | МКЗ | СЗ | МКЗ | СЗ | МКЗ | СЗ | МКЗ | СЗ | МКЗ |
| 20 | 0,10 | 0,02 | 0,25 | 0,12 | 0,18 | 0,003 | 0,003 | >11 | | 2,5 |
| 40 | 0,20 | 0,01 | 0,23 | 0,07 | 0,17 | 0,004 | 0,003 | >11 | | 4,0 |
| 55 | 0,28 | 0,01 | 0,22 | 0,05 | 0,16 | 0,004 | 0,004 | >11 | | 6,0 |
| 70 | 0,36 | 0,01 | 0,21 | 0,04 | 0,15 | 0,005 | 0,004 | >11 | | 8,0 |
| 90 | 0,46 | 0,01 | 0,20 | 0,04 | 0,14 | 0,006 | 0,005 | >11 | | 10,0 |
| 115 | 0,59 | 0,01 | 0,19 | 0,03 | 0,13 | 0,008 | 0,005 | >11 | | 11,0 |

Примечание. МКЗ – многокомпонентная загрузка; СЗ – стандартная многослойная загрузка; Δp – перепад давления на фильтре; знак >11 означает, что проскок по железу в пределах продолжительности опыта не наблюдался для рассматриваемых вариантов загрузки.

Практическое значение результатов

Практическое значение полученных результатов состоит в подтверждении возможности применения многокомпонентной загрузки в качестве рабочего фильтрующего материала для локальной очистки промывных вод станций обезжелезивания. Установлено, что МКЗ обеспечивает высокую эффективность удаления железа, устойчивую работу по марганцу и приемлемые гидравлические



характеристики, что позволяет рассматривать ее как перспективную загрузку для включения в состав блочно-модульных установок водоподготовки.

В отличие от ранее опубликованных работ, посвященных исследованию отдельных компонентов загрузки – торфа, шлама водоподготовки и других природных и техногенных материалов [4–9], в настоящей статье дана оценка эффективности многокомпонентной системы в целом в условиях опытно-промышленных испытаний. Это позволяет перейти от обоснования выбора компонентов к практической оценке работоспособности сформированной загрузки в реальном технологическом режиме.

Дополнительная практическая значимость результатов связана с возможностью вовлечения шлама водоподготовки во вторичное использование. Такой подход соответствует принципам ресурсосбережения и позволяет рассматривать разработанную технологию не только как средство очистки промывных вод, но и как одно из направлений экологически безопасного обращения с отходами водоподготовки [3, 6].

Выводы

1. В опытно-промышленных испытаниях на реальных промывных водах станции обезжелезивания при исходных концентрациях общего железа – 8,2 мг/л, марганца – 0,2 мг/л, установлено, что многокомпонентная загрузка обеспечивает более устойчивую работу по сравнению со стандартными зернистыми загрузками по совокупности показателей качества очистки и гидравлической устойчивости.

2. Показано, что удаление железа на многокомпонентной загрузке протекает по гидролитико-сорбционно-фильтрационному механизму и связано с удержанием гидролизированных форм Fe(III) на поверхности частиц и в поровом пространстве фильтрующего слоя.

3. Установлено, что лимитирующим показателем процесса является марганец, по которому в наибольшей степени оценивается продолжительность эффективной работы фильтра.

4. При увеличении объема многокомпонентной загрузки от 20 до 115 л концентрация железа в фильтрате снижается с 0,02 до 0,01 мг/л, концентрация марганца – с 0,12 до 0,03 мг/л, а время до «проскока» по марганцу возрастает с 2,5 до 11,0 ч.

5. Увеличение объема загрузки сопровождается ростом перепада давления от 0,003 до 0,008 МПа, что указывает на необходимость учета соотношения между ресурсом фильтра и гидравлическим сопротивлением при выборе параметров фильтрующего слоя.

6. Рациональным диапазоном объема многокомпонентной загрузки для блочно-модульных установок водоподготовки является 55–90 л, что соответствует высоте слоя 0,28–0,46 м и обеспечивает наиболее благоприятное сочетание качества очистки и гидравлической устойчивости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суворов, И. В. Современные безреагентные и реагентные методы удаления железа из воды / И. В. Суворов, Д. В. Ульрих // Современные технологии в инженерных системах и городском хозяйстве : сборник материалов Национальной (всероссийской) научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 18–22 марта 2024 года. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2024. – С. 251–262. – EDN GIUGUE.



2. Суворов, И. В. Особенности устройства и эксплуатации станций обезжелезивания воды / И. В. Суворов, Д. В. Ульрих // Современные технологии в инженерных системах и городском хозяйстве : сборник материалов LXXVII Национальной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Актуальные проблемы современного строительства», Санкт-Петербург, 15–18 октября 2024 года. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2025. – С. 17–25.

3. Experimental study for sand filter backwash water management: low-cost treatment for recycling and residual sludge utilization for radium removal / M. Shafiquzzaman, S. S. AlSaleem, H. Haider [et al.] // Water. – 2021. – Vol. 13, No 20. – Art. 2799. – DOI 10.3390/w13202799.

4. Торф в очистке природных вод. Сравнительный анализ фильтрационных свойств различных типов торфа / И. В. Суворов, Д. В. Ульрих, Т. М. Лонзингер, В. В. Шабалин // Инновации и инвестиции. – 2025. – № 7. – С. 507–511.

5. Комплексная характеристика шлама водоподготовки : химический состав, морфология и фильтрационные свойства / И. В. Суворов, Д. В. Ульрих, Т. М. Лонзингер, В. В. Шабалин // Инновации и инвестиции. – 2025. – № 8. – С. 694–698.

6. Sustainable utilization of water treatment residue as a porous geopolymer for iron and manganese removals from groundwater / P. K. Pachana, U. Rattanasak, K. Nuithitikul // Journal of environmental management. – 2022. – Vol. 302. – Art. 114036. – DOI 10.1016/j.jenvman.2021.114036.

7. Propolsky, D. Iron and manganese removal from groundwater: comprehensive review of filter media performance and pathways to polyfunctional applications / D. Propolsky, V. Romanovski // Environmental science : Water research & technology. – 2025. – DOI 10.1039/D5EW00751H.

8. Efficient chemical and microbial removal of iron and manganese in a rapid sand filter and impact of regular backwash / S. Haukelidsaeter, A. S Boersma, L. Piso [et al.] // Applied geochemistry. – 2024. – Vol. 162 (2). – Art. 105904. – DOI 10.1016/j.apgeochem.2024.105904.

9. Start-up of bench-scale biofilters for manganese removal under tropical conditions: a comparative study using virgin pumice, silica sand, and anthracite filter media / J. A. Araya-Obando, L. C. Rietveld, A. Quesada-González [et al.] // Environmental science : water research & technology. – 2021. – Vol. 7. – P. 1504–1515. – DOI 10.1039/D1EW00093D.

10. Improvement of removal rates for Iron and manganese in groundwater using dual-media filters filled with manganese-oxide-coated sand and ceramic in Nepal / A. M. Shrestha, S. Kazama, B. B. Sawangjang, S. Takizawa // Water. – 2024. – Vol. 16, No. 17. – Art. 2450. – DOI 10.3390/w16172450.

SUVOROV Ilya Vitalievich, postgraduate student of the chair of water use and ecology

EFFICIENCY OF MULTICOMPONENT FILTER MEDIA FOR TREATING BACKWASH WATER FROM IRON-REMOVAL PLANTS

St Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering.

4, 2nd Krasnoarmeiskaya St., St Petersburg, 190005, Russia.

Tel.: (812) 575-05-34, e-mail: rector@spbgasu.ru

Key words: backwash water, iron removal plants, multicomponent filter media, iron, manganese, filtration, pressure drop, water treatment.



The paper presents the results of assessing the efficiency of a multicomponent filter media (MFM) for the treatment of backwash water generated at groundwater iron-removal plants. The relevance of the study is determined by the formation of significant volumes of backwash water during the operation of iron-removal facilities and by the need to develop local resource-saving treatment technologies that also enable the reuse of water treatment waste.

REFERENCES

1. Suvorov I. V., Ulrikh D. V. Sovremennye bezreagentnye i reagentnye metody udaleniya zheleza iz vody [Modern non-reagent and reagent methods of iron removal from water]. Sovremennye tekhnologii v inzhenernykh sistemakh i gorodskom khozyaystve [Modern Technologies in Engineering Systems and Urban Utilities]: sbornik materialov Natsionalnoy (vserossiyskoy) nauchno-prakticheskoy konferentsii, Saint Petersburg, March 18–22, 2024. Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitelnyy universitet, 2024, P. 251–262. EDN GIUGUE.
2. Suvorov I. V., Ulrikh D. V. Osobennosti ustroystva i ekspluatatsii stantsiy obezazhelezivaniya vody [Design and operation features of iron removal water treatment plants]. Sovremennye tekhnologii v inzhenernykh sistemakh i gorodskom khozyaystve [Modern Technologies in Engineering Systems and Urban Utilities]: sbornik materialov LXXVII Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh “Aktualnye problemy sovremennogo stroitelstva”, Saint Petersburg, October 15–18, 2024. Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitelnyy universitet, 2025, P. 17–25.
3. Shafiquzzaman M., AlSaleem S. S., Haider H., Alresheedi M. T., Thabit H. Experimental study for sand filter backwash water management: low-cost treatment for recycling and residual sludge utilization for radium removal. *Water*, 2021, Vol. 13, No. 20, Art. 2799. DOI: 10.3390/w13202799.
4. Suvorov I. V., Ulrikh D. V., Lonzinger T. M., Shabalin V. V. Torf v ochistke prirodnkh vod. Sravnitelnyy analiz filtratsionnykh svoystv razlichnykh tipov torfa [Peat in natural water treatment. Comparative analysis of filtration properties of different peat types]. Innovatsii i investitsii [Innovations and Investments], 2025, № 7, P. 507–511.
5. Suvorov I. V., Ulrikh D. V., Lonzinger T. M., Shabalin V. V. Kompleksnaya kharakteristika shlama vodopodgotovki: khimicheskii sostav, morfologiya i filtratsionnye svoystva [Comprehensive characterization of water treatment sludge: chemical composition, morphology and filtration properties]. Innovatsii i investitsii [Innovations and Investments], 2025, № 8, P. 694–698.
6. Pachana P. K., Rattanasak U., Nuithitikul K., Horpibulsuk S., Chindaprasirt P. Sustainable utilization of water treatment residue as a porous geopolymer for iron and manganese removals from groundwater. *Journal of Environmental Management*, 2022, Vol. 302, Art. 114036. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.114036.
7. Propolsky D., Romanovski V. Iron and manganese removal from groundwater: comprehensive review of filter media performance and pathways to polyfunctional applications. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2025. DOI: 10.1039/D5EW00751H.
8. Haukelidsaeter S., Boersma A. S., Piso L., Lenstra W. K., van Helmond N. A. G. M., Schoonenberg F., van der Pol E., Hurtarte L. C. C., van der Wielen P. W. J. J., Behrends T., van Kessel M. A. H. J., Lückner S., Slomp C. P. Efficient chemical and microbial removal of iron and manganese in a rapid sand filter and impact of regular backwash. *Applied Geochemistry*, 2024, Vol. 162, Art. 105904. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2024.105904.
9. Araya-Obando J. A., Rietveld L. C., Quesada-González A., Caballero-Chavarría A., Pacini V., Romero-Esquivel L. G. Start-up of bench-scale biofilters for manganese removal under tropical conditions: a comparative study using virgin pumice, silica sand, and anthracite



filter media. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2021, Vol. 7, P. 1504–1515. DOI: 10.1039/D1EW00093D.

10. Shrestha A. M., Kazama S., Sawangjang B., Takizawa S. Improvement of removal rates for iron and manganese in groundwater using dual-media filters filled with manganese-oxide-coated sand and ceramic in Nepal. *Water*, 2024, Vol. 16, No. 17, Art. 2450. DOI: 10.3390/w16172450.

© **И. В. Суворов, 2026**

Получено: 12.05.2026 г.

УДК 69.058:691.32

А. Х. БАЙБУРИН, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры строительного производства и теории сооружений; **С. Г. АКИМОВ**, магистр кафедры строительного производства и теории сооружений, **Д. А. БАЙБУРИН**, ст. преп. кафедры строительного производства и теории сооружений

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ТОЧНОСТЬ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» (ЮУрГУ НИУ).
Россия, 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, д. 76.

Тел.: (351) 267-91-83; эл. почта: abayburin@mail.ru

Ключевые слова: железобетонные конструкции, эксплуатация, тяжелый бетон, прочность бетона, методы неразрушающих испытаний.

Цель исследований – сравнительные испытания прочности бетонных кубов неразрушающими методами упругого отскока, ударного импульса и ультразвукового прозвучивания при различных воздействиях эксплуатационных факторов. Изучалось влияние воздействия отрицательных температур, минерального масла и увлажнения на прочность тяжелого бетона класса В25 при сжатии. Методы определения прочности соответствовали стандартным. Установлено увеличение прочности бетона при замораживании образцов до минус 15 °С. При пропитке минеральным маслом показания прочности значительно снижаются. Увлажнение бетона приводит к снижению прочности для методов пластических деформаций и росту скорости ультразвука. Полученные результаты качественно подтверждают данные ранее выполненных исследований. По результатам испытаний были определены средние значения поправочных коэффициентов прочности по сравнению с нормальными условиями испытаний.

Введение

Последние достижения в области методов неразрушающего контроля (*NDT*) бетона включают: частотный подход, георадары (дефектоскопы, томографы), инфракрасные технологии, волоконно-оптические датчики, методы на основе видеокамер, лазерные сканеры, акустическая эмиссия и ультразвуковые методы [1]. Для повышения точности исследователи применяют методы машинного обучения, искусственный интеллект, комбинированные методы.

Перспективно комбинирование *NDT*, чувствительных к механическим свойствам и содержанию в бетоне влаги. К последним относят электрическое сопротивление, радиолокационный метод (*GPR*), ультразвуковые поверхностные волны и емкостной метод [2]. Диэлектрический метод, метод ядерного магнитного резонанса, ультразвуковые методы применяют для непрерывного мониторинга твердения бетонов [3]. Свои особенности имеет контроль прочности составов, формируемых 3D-печатью [4].

Среди факторов, влияющих на точность *NDT* бетона, отмечают модуль упругости, динамическую вязкость, структурную неоднородность, состав бетона, температуру, влажность, состояние поверхности материала. В работе [5]



оценивалось влияния типа цемента, срока твердения, размеров и влажности образцов бетона на скорость ультразвукового импульса. Доказано прямое влияние влажности бетона и степени гидратации на скорость ультразвука и прочность.

Известно, что нефтепродукты, пропитывая бетон, снижают его прочность, особенно, при растяжении за счет нарушения контакта между цементным камнем и заполнителем [6, 7]. В Руководстве НИИЖБ по защите железобетонных конструкций от действия нефтепродуктов (1983) указано, что сочетание вибрационных воздействий с промасливанием приводит к увеличению эффекта снижения прочности за счет интенсивного образования микродефектов в структуре бетона и проникновения в них нефтепродуктов. Имеет влияние и продолжительность воздействия минеральных масел на бетон [8].

Прямые испытания показывают снижение прочности бетона на сжатие с увеличением влажности, что объясняется расклинивающим действием воды в микротрещинах. Причем ультразвуковые и ударно-импульсные методы не показывают существенного снижения прочности. При влажности бетона более 2 % по массе более объективным является ударно-импульсный метод, применение ультразвуковых приборов приводит к завышенным значениям прочности бетона [9]. Испытания показывают, что увеличение содержания влаги на 10 % может снизить прочность при сжатии примерно на 5–9 %. При этом модуль упругости может возрасти до 30 %. Разница между неразрушающими и разрушающими испытаниями прочности растет с увеличением влажности бетона [10, 11].

После водонасыщения бетона классов по прочности С15, С20 и С30 в течение 10 суток до 48–72 % его прочность на сжатие снижалась на 21–27 % по сравнению с бетоном в сухом состоянии. При этом модуль упругости бетона увеличивался с ростом водонасыщенности в 1,18–1,24 раза [12].

Для замороженного бетона показания приборов *NDT* изменяются: ультразвуковой метод дает завышенные оценки, а метод упругого отскока заниженные. После оттаивания точность *NDT* повышается [13]. Многочисленные исследования показали упрочнение бетона при его замораживании за счет уплотнения его структуры кристаллами льда, а также за счет смерзания микротрещин в бетоне, что приводит к снижению концентрации растягивающих напряжений в их устьях. При температуре минус 54 °С призмная прочность возросла почти в 3 раза, а модуль упругости в 1,3–1,5 раза [14].

Исследование практичности *NDT* бетона остается актуальной задачей, особенно с целью уточнения влияния различных факторов (увлажнение, замораживание, замасливание и пр.), часто осложняющих контроль эксплуатируемых железобетонных конструкций.

Методы исследования

Цель исследования состояла в оценке влияния увлажнения, замораживания, замасливания бетона на точность определения его прочности на сжатие неразрушающими методами. При определении прочности бетона использовались неразрушающие методы по ГОСТ 22690-2015 и ГОСТ 17624-2021, которые сравнивались с контрольными разрушающими испытаниями образцов бетона по ГОСТ 28570-2019. Методика испытаний соответствовала требованиям указанных государственных стандартов и руководств по эксплуатации приборов.

Основные характеристики примененных измерительных приборов и машин представлены в табл. 1. Используемые средства измерений имели свидетельства о поверке на момент проведения испытаний.



Таблица 1

Характеристики приборов и оборудования для исследования

| Метод контроля прочности, норматив | Характеристики оборудования | | |
|---|--|---------------------------|--------------------------|
| | Наименование, марка прибора | Погрешность по паспорту | Предел измерений |
| Ударного импульса ГОСТ 22690-2015 | Измеритель прочности материалов ИПС-МГ4.03 | $\pm 8 \%$ | 3–100 МПа |
| Ударного импульса ГОСТ 22690-2015 | Электронный склерометр ОНИКС-2.5 | $\pm 8 \%$ | 1–100 МПа |
| Упругого отскока ГОСТ 22690-2015 | Молоток для испытаний бетона <i>SilverSchmidt PC N</i> | Не указана | 10–100 Н/мм ² |
| Ультразвуковой метод ГОСТ 17624-2021 | Прибор ультразвуковой Пульсар-1.2 | $\pm (0,01 \cdot V + 10)$ | 5–100 МПа |
| Разрушающий ГОСТ 28570-2019 | Гидравлическая испытательная машина <i>WAW-600 kN</i> | $\pm 1 \%$ | До 600 кН |

Методика исследований прочности бетона неразрушающими методами включала:

изготовление 4-х серий по 6 образцов-кубов ребром 100 мм, класс тяжелого бетона *B25* (серии соответственно замороженного, замасленного и увлажненного бетона, а также контрольная серия);

замораживание образцов серии 1 производилось в морозильной камере КХТВ-24 до минус 15 °С в течение 24 часов;

в серии 2 образцы выдерживались в ванне с минеральным (машинным) маслом при температуре 20 °С в течение 24 часов;

увлажнение образцов серии 3 выполнялось выдерживанием в ванне с водопроводной водой при температуре 20 °С в течение 24 часов;

определение прочности бетона на сжатие неразрушающими методами (см. табл. 1), а также испытания образцов до разрушения на испытательной машине *WAW-600 kN* до воздействия на бетон воды, минерального масла и отрицательной температуры и после воздействия;

определение значений средней прочности, среднеквадратичного отклонения, коэффициента вариации;

определение поправочных коэффициентов, оценивающих влияние воздействия на бетон замораживания, увлажнения и пропитки минеральным маслом и отрицательной температуры на точность контроля прочности бетона.

Результаты сравнительных испытаний

Результаты определения прочности бетона на сжатие различными методами описаны авторами в статье [15]. Приборы ударного импульса показали завышенные значения прочности по сравнению с испытаниями на гидравлическом прессе: на 9 и 23 % соответственно для ОНИКС-2.5 и ИПС МГ-4.03. Наиболее близкие значения прочности к эталонным испытаниям на прессе показали ультразвуковой метод и метод упругого отскока (отличие соответственно 1,2 и 2,8 %). Вариация прочности для косвенных неразрушающих методов изменялась от 5,2 до 8,7 %.

Результаты сравнительных неразрушающих испытаний различными методами прочности бетона в нормальном состоянии и после замораживания,



замасливания и увлажнения приведены в табл. 2. В отдельный столбец таблицы выделено среднее значение близких по физическому принципу действия неразрушающих методов ударного импульса и упругого отскока приборами ИПС, ОНИКС, склерометр Шмидта. Как видим, вариация показаний приборов (из шести образцов) лежала в допустимых пределах, кроме одного значения 0,195.

Таблица 2

Коэффициенты изменения прочности бетона при различных воздействиях

| Воздействие на образцы-кубы | Коэффициенты изменения прочности k и вариация v для прибора | | | | | |
|-----------------------------|---|-----------|----------------|----------------|------------------|----------------|
| | ИПС МГ-4.03 | ОНИКС-2.5 | Молоток Шмидта | УЗ Пульсар-1.2 | Среднее значение | Среднее без УЗ |
| Заморозка k_1 | 1,116 | 0,982 | 0,986 | 1,141 | 1,056 | 1,028 |
| Вариация v_1 | 0,086 | 0,033 | 0,083 | 0,053 | 0,064 | 0,067 |
| Масло k_2 | 0,807 | 0,898 | 0,819 | 0,680 | 0,801 | 0,841 |
| Вариация v_2 | 0,126 | 0,114 | 0,139 | 0,195 | 0,144 | 0,126 |
| Влага k_3 | 0,848 | 0,868 | 0,699 | 1,177 | 0,898 | 0,805 |
| Вариация v_3 | 0,126 | 0,098 | 0,070 | 0,109 | 0,101 | 0,098 |

Усредненные значения поправочного коэффициента, выраженного отношением показаний в замороженном и нормальном состоянии, показаны на графике (рис. 1). Среднее значение поправочного коэффициента равно 1,06. При этом испытания подтвердили данные [13] о завышении результатов ультразвуковым методом и занижении – методом упругого отскока.

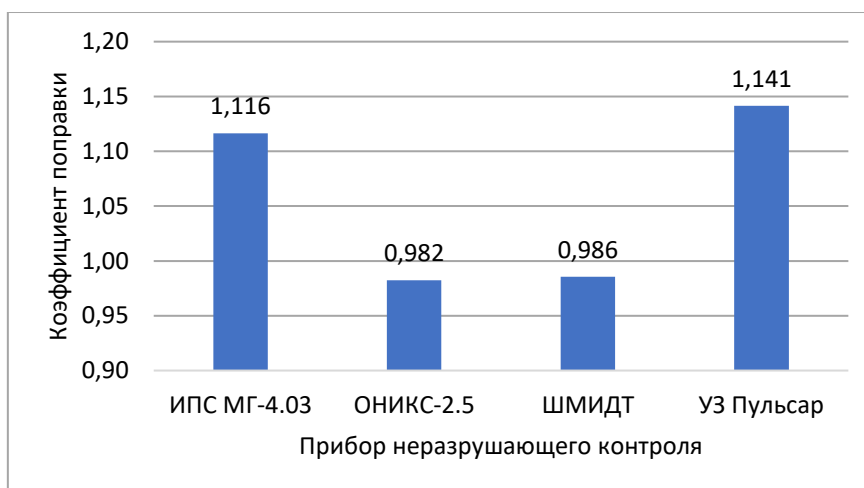
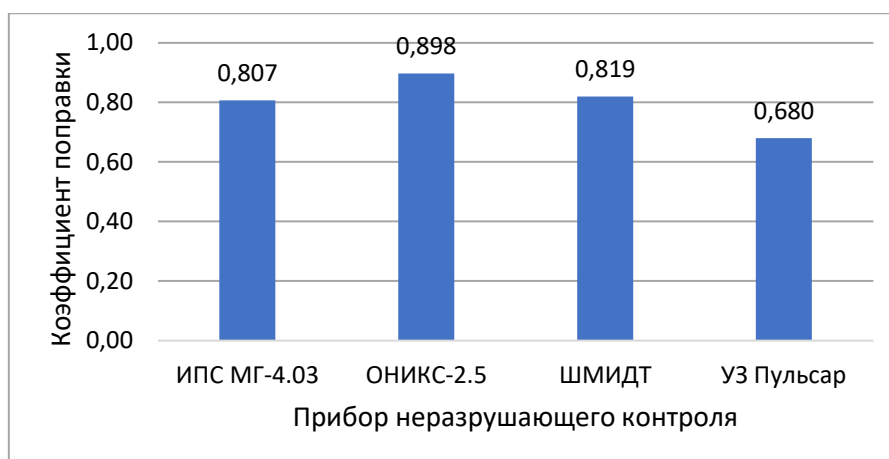
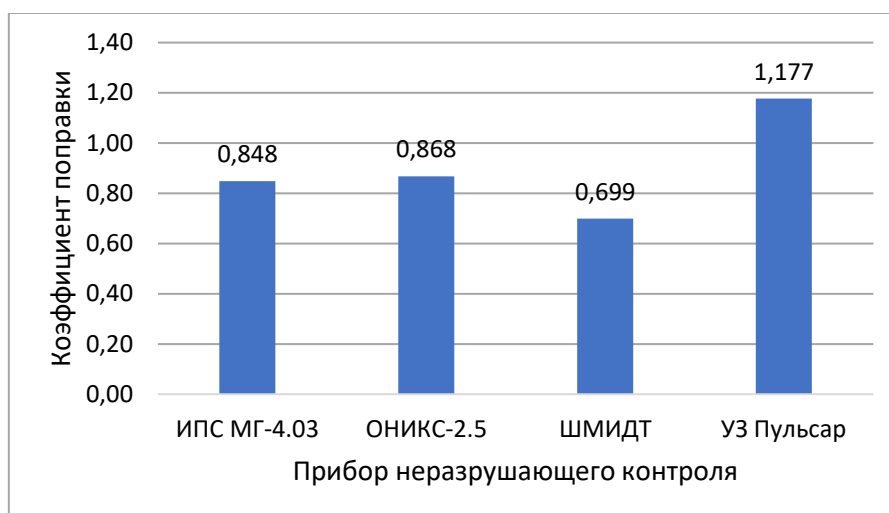


Рис. 1. Влияние замораживания бетона до минус 15 °С на показания приборов *NDT*

Средние значения поправочного коэффициента при переходе от прочности при пропитке минеральным маслом к прочности в нормальном состоянии приведены на рис. 2. Среднее значение поправочного коэффициента равно 0,84, а без учета УЗ метода – 0,80. Результаты испытаний подтверждают данные [6, 7] о значительном влиянии пропитки минеральным маслом на прочность бетона, что объясняется нарушением сцепления различных составляющих бетона при пропитке маслом.

Рис. 2. Влияние замасливания бетона на показания приборов *NDT*

Усредненные значения поправочного коэффициента, выраженного отношением показаний в увлажненном и нормальном состоянии, показаны на графике рис. 3.

Рис. 3. Влияние увлажнения бетона на показания приборов *NDT*

Среднее значение поправочного коэффициента равно 0,90. Ультразвуковой метод показал коэффициент 1,18. Известные данные [12] подтверждают факт снижения прочности при увлажнении бетона. При этом другой принцип действия ультразвукового метода дает прямо противоположный результат.

Заключение

Экспериментально определено влияние замораживания бетона на результаты неразрушающего контроля его прочности различными методами. При замораживании до минус 15 °С в течение 24 часов показания прочности увеличиваются на 12–14 % для различных методов, что объясняется упрочняющим действием льда. Вместе с тем, метод упругого отскока (молоток



Шмитда) и ударного импульса (ОНИКС-2.5), не выявил существенного изменения прочности при процессе замораживания кубов-образцов.

Исследовано влияние при пропитке бетона минеральным маслом на результаты неразрушающего контроля его прочности различными приборами. При выдерживании образцов в ванне с машинным маслом при температуре 20 °С в течение 24 часов показания прочности уменьшаются в интервале 10–32 % для разных методов. Наименьшее влияние характерно для метода ударного импульса (прибор ОНИКС-2.5).

Изучено влияние фактора замачивания бетона на результаты неразрушающего контроля его прочности различными методами. При выдерживании образцов в ванне с водопроводной водой при температуре 20 °С в течение 24 часов показания прочности уменьшаются на 15–30 % для методов пластических деформаций. Испытание ультразвуковым методом, наоборот, показало увеличение прочности на 18 % после увлажнения образцов-кубов.

Перспективы дальнейших исследований могут быть связаны с построением регрессионных зависимостей влияния различных температур замораживания бетона, длительности воздействия минерального масла и замачивания на прочность тяжелого бетона различных классов и составов, а также изучением изменений тарировочных зависимостей косвенных методов контроля прочности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Recent advancements in nondestructive Advances in Civil Engineering 11 testing techniques for structural health monitoring / P. Kot, M. Muradov, M. Gkantou [et al.] // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, № 6. – P. 1–28.
2. Evaluation of Concrete Properties by Combining NDT Methods / J. P. Balayssac, S. Laurens, D. Breyse, V. Garnier // Nondestructive Testing of Materials and Structures. Proceedings of NDTMS-2011. – Istanbul, Turkey, 2011. – P. 187–192.
3. Schabowicz, K. Non-destructive testing of materials in civil engineering / K. Schabowicz // Materials. – 2019. – Vol. 12, № 19. – P. 3237.
4. Сорокина, Е. А. Анализ и оценка методов определения прочности бетона для аддитивной технологии / Е. А. Сорокина, Н. О. Копаница // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 87–95.
5. Factors influencing ultrasonic pulse velocity in concrete / J. P. Godinho, T. F. De Souza J'uniór, M. H. F. Medeiros, M. S. A. Silva // Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. – 2020. – Vol. 13, № 2. – P. 222–247.
6. Влияние вязкости нефтепродуктов на деформативные свойства бетона / А. П. Свинцов, Ю. В. Николенко, М. И. Харун, А. С. Казаков // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 7. – С. 16–22.
7. Яковлева, М. В. Влияние минеральных масел на железобетонные конструкции / М. В. Яковлева, Ю. Ф. Юсупова // Известия вузов. Строительство. – 2009. – № 9. – С. 116–122.
8. Улыбин, А. В. Изменение прочности промасленного бетона эксплуатируемых конструкций / А. В. Улыбин // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения : материалы VII международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017. – С. 270–283.
9. Несветаев, Г. В. Особенности неразрушающего контроля прочности бетона эксплуатируемых железобетонных конструкций / Г. В. Несветаев, А. В. Коллеганов, Н. А. Коллеганов. – Текст : электронный // Науковедение : интернет-журнал. – 2017. –



Т. 9, № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-nerazrushayushchego-kontrolya-prochnosti-betona-ekspluatiruemyh-zhelezobetonnyh-konstruktsiy/viewer>.

10. Бурмин, А. В. Влияние влажности бетона на точность определения прочности / А. В. Бурмин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2007. – № 4. – С. 135–138.

11. Analysis the effect of moisture content of normal concrete using hammer test / Mujahadah N., Hariyadi, Kencanawati N. N., Ngudiyono // AIP Conference Proceedings. – 2023. – 2609, 050006.

12. Influence of Humidity on the Elastic Modulus and Axis Compressive Strength of Concrete in a Water Environment / G. Zhang, C. Li, H. Wei, M. Wang, Z. Yang, Y. Gu // Materials. – 2020. – № 13 (24) : 5696. – P. 1–14.

13. Снежков, Д. Ю. Повышение достоверности контроля прочности бетона неразрушающими методами на основе их комбинирования / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 1. – С. 25–32.

14. Хомякова, И. В. Исследование прочностных и деформативных параметров бетонов в замороженном состоянии / И. В. Хомякова, Л. В. Узунова // Балтийский морской форум : материалы XI Международного Балтийского морского форума. – Калининград : Калининградский государственный технический университет, 2023. – С. 322–329.

15. Байбурин, А. Х. Анализ точности неразрушающих методов контроля прочности бетона / А. Х. Байбурин, С. Г. Акимов, Д. А. Байбурин // Русский журнал строительных наук и технологий. – 2024. – Т. 10, № 1. – 1001002.

BAYBURIN Albert Khalitovich, doctor of technical sciences, associate professor, professor of the chair of building technologies and structural engineering; AKIMOV Sergey Gennadievich, master degree student of the chair of building technologies and structural engineering; BAYBURIN Denis Albertovich, senior teacher of the chair of building technologies and structural engineering

INFLUENCE OF OPERATIONAL FACTORS ON THE ACCURACY OF NON-DESTRUCTIVE METHODS OF CONCRETE STRENGTH TESTING

South Ural State University (SUSU).

76, Lenina Prospect, Chelyabinsk, 454080, Russia.

Tel.: (351) 267-91-83, e-mail: abayburin@mail.com

Keywords: reinforced concrete structures, operation, heavy concrete, concrete strength, non-destructive testing methods.

The goal of the research was to perform comparative tests of the strength of concrete cubes using non-destructive methods such as elastic rebound, impact impulse, and ultrasonic testing under various operational influences. The study examined the impact of negative temperatures, mineral oil, and moisture on the compressive strength of heavy concrete of class B25. The strength determination methods complied with standard requirements. It was found that the strength of the concrete increased when the samples were frozen to -15°C . Soaking in mineral oil led to a significant decrease in strength readings. Moistening the concrete resulted in a decrease in strength for plastic deformation methods and an increase in the speed of ultrasound. The obtained results qualitatively corroborate the data from previously conducted studies. Based on the test results, average values of strength correction factors were determined in comparison to normal testing conditions.



REFERENCES

1. Kot P., Muradov M., Gkantou M., Kamaris G. S., [et al.] Recent advancements in nondestructive Advances in Civil Engineering 11 testing techniques for structural health monitoring. *Applied Sciences*. 2021, No. 6 (11), P. 1–28.
2. Balayssac J. P., Laurens S., Breyse D. and Garnier V. Evaluation of Concrete Properties by Combining NDT Methods. *Nondestructive Testing of Materials and Structures. Proceedings of NDTMS-2011. Istanbul, Turkey*. 2011, P. 187–192.
3. Schabowicz K. Non-destructive testing of materials in civil engineering. *Materials*. 2012, No. 12 (19), 3237.
4. Sorokina E. A., Kopanitsa N. O. Analiz i otsenka metodov opredeleniya prochnosti betona dlya additivnoi tekhnologii [Analysis and evaluation of methods for determining the strength of concrete for additive technology]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering]. 2021, № 2 (23), P. 87–95.
5. Godinho J. P., De Souza J'uniór T. F., Medeiros M. H. F., and Silva M. S. A. Factors influencing ultrasonic pulse velocity in concrete. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* [IBRACON Magazine of Structures and Materials]. 2020, No. 2 (13), P. 222–247.
6. Svintsov A. P., Nikolenko Yu. V., Harun M. I., Kazakov A. S. Vliyanie vyazkosti nefteproduktov na deformativnye svoystva betona [The effect of viscosity of petroleum products on the deformative properties of concrete]. *Inzhenerno-stroitel'ny zhurnal* [Civil Engineering Magazine]. 2014, № 7, P. 16–22.
7. Yakovleva M. V., Yusupova Yu. F. Vliyanie mineralnykh masel na zhelezobetonnye konstruksii [The Effect of Mineral Oils on Reinforced Concrete Structures]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Construction]. 2009, № 9, P. 116–122.
8. Ulybin A. V. Izmenenie prochnosti promaslennogo betona ehkspluatiruemykh konstruksii [Alteration in the strength of oiled concrete in serviceable structures]. *Obsledovanie zdaniy i sooruzheniy: problemy i puti ikh resheniya* [Survey of Buildings and Structures: Problems and Solutions]. *Materialy VII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2017. P. 270–283.
9. Nesvetaev G. V., Kolleganov A. V., Kolleganov N. A. Osobennosti nerazrushayushchego kontrolya prochnosti betona ehkspluatiruemykh zhelezobetonnykh konstruksii [Features of Non-Destructive Concrete Strength Testing of Operated Reinforced Concrete Structures]. *Internet-zhurnal Naukovedenie* [Internet Journal of Science]. 2017, № 2 (9).
10. Burmin A. V. Vliyanie vlazhnosti betona na tochnost opredeleniya prochnosti [The effect of concrete moisture on the accuracy of strength determination]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering], 2007, № 4, 135–138.
11. Mujahadah N., Hariyadi, Kencanawati N. N., Ngudiyono. Analysis the effect of moisture content of normal concrete using hammer test. *AIP Conference Proceedings*. 2023, 2609, 050006.
12. Zhang G., Li C., Wei H., Wang M., Yang Z. and Gu Y. Influence of Humidity on the Elastic Modulus and Axis Compressive Strength of Concrete in a Water Environment. *Materials*, 2020. No.13 (24):5696, P. 1–14.
13. Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N. Povyshenie dostovernosti kontrolya prochnosti betona nerazrushayushchimi metodami na osnove ikh kombinirovaniya [Improving the reliability of non-destructive concrete strength testing by combining different methods]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2018, № 1. P. 25–32.
14. Khomyakova I. V., Uzunova L. V. Issledovanie prochnostnykh i deformativnykh parametrov betonov v zamorozhennom sostoyanii [Research on the strength and deformation



parameters of concretes in a frozen state]. Materialy XI Mezhdunarodnogo Baltiiskogo morskogo foruma. [Proceedings of the 11th International Baltic Maritime Forum]. Kaliningrad, 2023. P. 322–329.

15. Baiburin A. Kh., Akimov S. G., Baiburin D. A. Analiz tochnosti nerazrushayushchikh metodov kontrolya prochnosti betona [Analysis of the accuracy of non-destructive methods for monitoring concrete strength]. Russkii zhurnal stroitelnykh nauk i tekhnologiy. [Russian Journal of Construction Science and Technology]. 2024, № 1 (10), 1001002.

© **А. Х. Байбурин, С. Г. Акимов, Д. А. Байбурин, 2026**

Получено: 01.03.2026 г.



УДК 69.05

З. Р. МУХАМЕТЗЯНОВ, д-р. техн. наук, проф. кафедры автомобильных дорог, мостов и транспортных сооружений; **Е. А. СУЛТАНОВА**, канд. техн. наук, доц. кафедры вычислительной техники и инженерной кибернетики; **М. З. ЗАРИПОВ**, канд. техн. наук, зав. лабораторией кафедры оборудования и технологии сварки и контроля; **А. А. АЛЛАЯРОВ**, студент кафедры транспорта и хранения нефти и газа

ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ ОТРАСЛЕВЫХ КОМПЛЕКСОВ

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1.

Тел.: (917) 780-35-05, эл. почта: zinur-1966@mail.ru

Ключевые слова: отраслевые комплексы, организационно-технологические решения, динамическая система, системный подход, устойчивость.

Изучение процесса строительства отраслевых комплексов целесообразно проводить с использованием системного, структурного и динамического подходов. Такая структура исследований позволяет обосновать необходимые и достаточные условия достижения устойчивости и стабильности организационно-технологических решений при строительстве отраслевых комплексов.

Введение

Отраслевые комплексы относятся к комплексам, объединяющим связанные между собой по производственной и потребительской цепочке объекты. Строительство отраслевых комплексов, отличающееся высокой динамичностью, т. е. постоянным изменением форм, методов и условий производства работ, необходимостью соблюдения интересов собственника по эффективному вложению капитала инвестора в строительство является сложной и трудоемкой задачей. Не вызывает сомнения тот факт, что для успешного решения этой задачи необходима эффективная проработка всех возможных вариантов моделей организации работ в целях их сопоставления и выбора наиболее рационального из них для конкретных производственных условий. Основой для решения этой задачи является обеспечение устойчивости проектируемых организационно-технологических решений.

Следует подчеркнуть, что методологическая основа принятия решений по организации строительства промышленных предприятий, рассчитанных на несколько лет, разработана достаточно полно и изложена в работах многих отечественных ученых [1–10].

Но при этом детально не проработаны вопросы, касающиеся обеспечения стабильности и устойчивости разрабатываемых организационно-технологических решений при синхронном строительстве объектов, являющихся составными частями отраслевых комплексов. Поэтому эта проблема при реализации организационно-технологических решений такой многосвязной системы, как строительство комплексов, является актуальной задачей.

Таким образом, ставится задача для организационно-технологического проектирования в разработке стабильных и устойчивых к действиям возмущающих факторов организационно-технологических решений и обладающих потенциалом простоты их корректировки в соответствии с реальной обстановкой в случае изменения ситуации на строительной площадке и, как следствие, повышение скорости принятия решений.

Материалы и методы

Процесс строительства отраслевого комплекса рассматривается как сложная многосвязная динамическая система.

Для решения практических задач методология использует общесистемные принципы, подходы, законы, моделирование, с помощью которых выявляются основные свойства системы и выбираются способы достижения цели исследований (рис.).

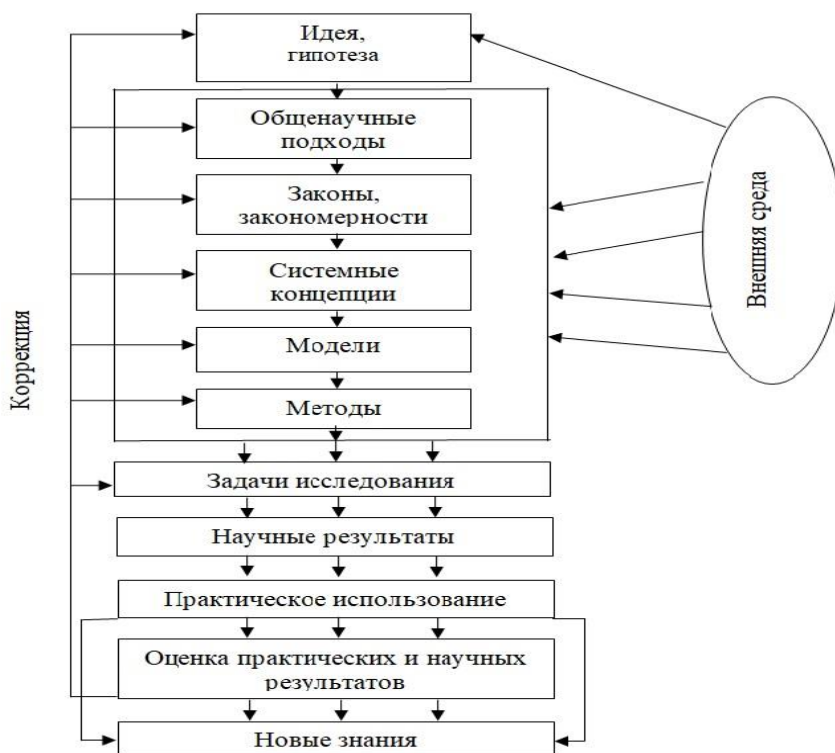


Рисунок. Методология исследования систем

Подходы в методологии, основанные на общенаучных принципах, позволяют обосновать выбор и разработку методики изучения, анализа, моделирования и выявляют взаимодействие поставленных для решения задач (табл.).

Изучение процесса строительства отраслевых комплексов с использованием системного подхода происходит на основе общесистемных принципов. В соответствии с этим процесс строительства отраслевого комплекса представляется в виде строительства множества различных объектов (подсистем), объединенных единой производственно-потребительской цепочкой и принципом отраслевого объединения.



Таблица

**Общенаучные подходы методологии и решаемые задачи
при разработке условий устойчивости организационно-технологических
решений**

| Подход | Решаемая задача |
|------------------------|--|
| 1. Системный подход | 1.1. Формирование цели строительства отраслевого комплекса 1.2. Деление отраслевого комплекса на подсистемы 1.3. Выявление системных свойств процесса строительства отраслевого комплекса |
| 2. Структурный подход | 2.1. Разработка структуры исследований подсистем отраслевого комплекса 2.2. Разработка структуры исследований отраслевого комплекса |
| 3. Динамический подход | 3.1. Исследование устойчивости организационно-технологических решений при строительстве объектов (подсистем) 3.2. Исследование устойчивости организационно-технологических решений при строительстве отраслевого комплекса (системы) 3.3. Разработка динамической модели организационно-технологических решений при строительстве объектов (подсистем) 3.4. Разработка динамической модели организационно-технологических решений при строительстве отраслевого комплекса (системы) |

Результаты

Анализ свойств отраслевых комплексов выявил наиболее существенные из них для использования при решении задачи по достижению устойчивости организационно-технологических решений. К ним относятся [11]:

1. Отраслевой комплекс является многокомпонентной системой, для которого характерно:

- наличие некоторого количества связанных между собой подсистем (предприятий, объектов), сооружаемых независимо друг от друга, но имеющих общие сроки окончания строительства;
- постоянство цели возведения подсистем (объектов);
- неизменчивость структуры, показателей и параметров строительного процесса подсистем (объектов).

2. Строительство отраслевых комплексов, представленное в виде множества отдельных подсистем, имеющих тесные и прочные связи между собой, собственные локальные цели и функции, представляет собой динамическую систему, для которой характерны динамически равновесные и динамически неравновесные состояния.

3. Строительство отраслевых комплексов происходит в условиях неопределенности внешней среды, которая характеризуется совокупностью действий множества факторов, не поддающихся точному описанию, плохо формализуемых, в том числе экономического и социального характера.

Выделенные свойства общей системы строительства отраслевых комплексов позволяют оценивать процесс строительства, как класс динамических систем, отличающихся множеством связей, многофункциональностью, и рассматривать



процесс строительства отраслевого комплекса, как объединяющего строительство множества объектов, взаимосвязанных между собой единой производственной и потребительской цепочкой. Тогда при анализе устойчивости организационно-технологических решений при строительстве отраслевых комплексов целесообразно изучить условия устойчивости системы организации строительства отдельных объектов (подсистем) и синтезировать структуры и алгоритмы принятия решений, обеспечивающие устойчивую реализацию разработанных организационно-технологических решений при строительстве отраслевых комплексов в целом.

Выявление и сопоставление всех известных научных характеристик, в зависимости от области исследования, понятие «устойчивость» позволяет утверждать, что устойчивость организационно-технологических решений при строительстве отраслевого комплекса должна обладать свойством сохранять динамически равновесное состояние под действием различных воздействий внешней среды. При этом динамически равновесным состоянием системы реализации организационно-технологических решений следует понимать такое состояние, которое способствует выполнению запланированного темпа выполнения строительно-монтажных работ по строительству отраслевого комплекса. С точки зрения моделирования устойчивость разрабатываемых организационно-технологических решений для строительства отраслевого комплекса достигается за счет введения ограничений и условий, которые устанавливают реальный диапазон вокруг равновесной траектории, в пределах которого находятся приемлемые траектории.

Для решения задачи обеспечения устойчивости организационно-технологических решений при строительстве отраслевых комплексов применяется подход, согласно которого характеристики организации строительства отраслевых комплексов описываются через характеристики организации строительства отдельных объектов.

Особенностью такого подхода является использование для исследования метода системного анализа и математического моделирования. В соответствие с системным подходом процесс строительства отраслевого комплекса представляется в виде строительства множества отдельных объектов (подсистем), из которых состоит отраслевой комплекс. В качестве отдельных объектов рассматриваются отдельные предприятия, связанные по производственной и потребительской цепочке, когда выпускаемая продукция одного объекта используется в качестве полуфабриката для обработки другим объектом, единством финансовых потоков, общностью социально-экономических целей, отраслевым принципом.

Для создания условий устойчивой реализации организационно-технологических решений необходимо соблюдать известные системные принципы. Одним из таких принципов является принцип координирования строительства подсистем. Согласно этому принципу подсистемы (объекты) должны своевременно и согласованно друг с другом заканчиваться строительством и вводится в эксплуатацию, т. е. процесс возведения всех объектов должен реализовываться с согласованными темпами выполнения запланированных объемов строительно-монтажных работ.



Выводы

Проведение исследований по предложенной авторами методологии позволяет описать систему принятия организационно-технологических решений при строительстве отраслевых комплексов с использованием параметров организации строительства отдельных объектов, из которых состоит отраслевой комплекс. При этом появляется возможность получить необходимые и достаточные условия достижения устойчивости организационно-технологических решений при строительстве отдельных объектов, исследовать влияние этих условий на устойчивость организационно-технологических решений отраслевых комплексов и на этой основе решить задачу обеспечения устойчивости организационно-технологических решений в целом при строительстве отраслевых комплексов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оптимизация технологии и организации монтажа изотермического резервуара как составного элемента отраслевого комплекса / З. Р. Мухаметзянов, Р. В. Разяпов, Т. А. Могучева, Д. Р. Батырова // Экономика строительства. – 2021. – № 6 (72). – С. 48–57. – EDN BJGOKH.
2. Мухаметзянов, З. Р. Разработка метода капитального ремонта магистральных трубопроводов с применением композитных материалов / З. Р. Мухаметзянов, Н. Э. Урманшина, Р. А. Фаюршин // Вестник НИЦ Строительство. – 2022. – № 1 (32). – С. 141–153. – DOI 10.37538/2224-9494-2022-1(32)-141-153. – EDN UHBNAP.
3. Mukhametzyanov, Z. R. Mechanism of development of organizational solutions based on a technological interaction between construction works and processes / Z. R. Mukhametzyanov, R. V. Razyapov // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2018. – No. 3 (39). – P. 85–92.
4. Михальченко, О. Ю. Формирование метода принятия организационно-технологических решений при строительстве объектов капитального строительства в ходе реализации национальных проектов : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Михальченко Олег Юрьевич. – Новосибирск, 2025. – 268 с.
5. Лapidус, А. А. Метод формирования организационно-технических решений при строительстве / А. А. Лapidус, И. Э. Файзуллин, О. Ю. Михальченко // Строительное производство. – 2024. – № 4. – С. 3–8. – DOI 10.54950/26585340_2024_4_3. – EDN BQXJYN.
6. Абиленцев, С. Ю. Практическая реализация проекта в условиях Крайнего Севера на основе комплексного показателя качества организационно-технологических решений / С. Ю. Абиленцев, А. А. Лapidус // Перспективы науки. – 2025. – № 1 (184). – С. 53–63. – EDN AUNJSB.
7. Адамцевич, Л. А. Организационно-технологические решения при управлении жизненным циклом объектов строительства в проектах комплексного развития территорий / Л. А. Адамцевич, А. А. Лapidус // Строительство: наука и образование. – 2025. – Т. 15, № 3. – С. 176–188. – DOI 10.22227/2305-5502.2025.3.11. – EDN KSDBEB.
8. Лapidус, А. А. Обоснование процесса выбора организационно-технологических решений / А. А. Лapidус, П. П. Олейник // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 4. – С. 70–74. – DOI 10.33622/0869-7019.2024.04.70-74. – EDN IHPPPR.
9. Олейник, П. П. Определение организационно-технологических параметров жилых зданий из крупногабаритных объемных блоков / П. П. Олейник, Л. А. Пахомова // Real Estate: Economics, Management. – 2023. – № 4. – P. 55–59. – DOI 10.22337/2073-8412-2022-4-55-59. – EDN WLSQEE.



10. Ескалиев, М. Ж. Метод обоснования организационно-технологических решений при малоэтажном жилищном строительстве / М. Ж. Ескалиев. – Текст : электронный // Строительное производство. – 2025. – № 4. – URL: <https://naukaru.ru/ru/nauka/article/106025/view?ysclid=mpdsf2xh6b588747765>.

11. Мухаметзянов, З. Р. Развитие методологии и теории разработки организационно-технологических решений по строительству отраслевых комплексов : специальность 05.23.08 «Технология и организация строительства» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Мухаметзянов Зинур Ришатovich ; Национальный исследовательский московский государственный строительный университет. – Москва, 2021. – 293 с. – EDN OXHXNH.

MUKHAMETZYANOV Zinur Rishatovich, doctor of technical science, professor of the chair of highways, bridges and transport structures; SULTANOVA Ekaterina Aleksandrovna, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of computer science and engineering cybernetics; ZARIPOV Mars Zulfatovich, candidate of technical sciences, head of the laboratory of welding equipment and technology chair; ALLAYAROV Ayvar Arturovich, student of the chair of oil and gas transportation and storage

BASES OF SUSTAINABILITY OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR CONSTRUCTION OF INDUSTRIAL COMPLEXES

Ufa State Petroleum Technological University.

1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064, Russia.

Tel.: (917) 780-35-05; e-mail: zinur-1966@mail.ru

Key words: industrial complexes, organizational and technological solutions, dynamic system, a systematic approach, sustainability.

The construction process of industrial complexes is best studied using systemic, structural, and dynamic approaches. This research structure allows us to justify the necessary and sufficient conditions for achieving sustainability and stability of organizational and technological solutions in the construction of industrial complexes.

REFERENCES

1. Mukhametzyanov Z. R., Razyapov R. V., Mogucheva T. A., Batyrova D. R. Optimizatsiya tekhnologii i organizatsii montazha izotermicheskogo rezervuara kak sostavnogo elementa otraslevogo kompleksa [Optimization of technology and organization of installation of an isothermal tank as a component of an industrial complex]. *Ekonomika stroitelstva* [Construction Economics]. Nizhny Novgorod, 2021, № 6 (72), P. 48–57. EDN BJGOKH.

2. Mukhametzyanov Z. R., Urmanshina N. E., Fayurshin R. A. Razrabotka metoda kapitalnogo remonta magistralnykh truboprovodov s primeneniem kompozitnykh materialov [Development of a method for capital repair of trunk pipelines using composite materials]. *Vestnik NITS Stroitelstvo* [Bulletin of Scientific Research Center of Construction]. Moscow, 2022, № 1 (32), P. 141–153. DOI 10.37538/2224-9494-2022-1(32)-141-153. EDN UHBNAP.

3. Mukhametzyanov Z. R., Razyapov R. V. Mechanism of development of organizational solutions based on a technological interaction between construction works and processes. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. Voronezh, 2018, No. 3 (39), P. 85–92.



4. Mikhaltchenko O. Yu. Formirovanie metoda prinyatiya organizatsionno-tekhnologicheskikh resheniy pri stroitelstve obyektov kapitalnogo stroitelstva v khode realizatsii natsionalnykh projektov [Formation of a method for making organizational and technological decisions in the construction of capital construction projects during the implementation of national projects] : diss. ... dok. tekhn. nauk. Novosibirsk, 2025, 268 p.

5. Lapidus A. A., Fayzullin I. E., Mikhaltchenko O. Yu. Metod formirovaniya organizatsionno-tekhnicheskikh resheniy pri stroitelstve [Method for forming organizational and technical decisions in construction]. Stroitelnoe proizvodstvo [Construction Production]. Moscow, 2024, № 4, P. 3–8. DOI 10.54950/26585340_2024_4_3. EDN BQXJYN.

6. Abilentsev S. Yu., Lapidus A. A. Prakticheskaya realizatsiya projekta v usloviyakh Kraynego Severa na osnove kompleksnogo pokazatelya kachestva organizatsionno-tekhnologicheskikh resheniy [Practical implementation of a project in the Far North based on a comprehensive quality indicator of organizational and technological solutions]. Perspektivy nauki [Science Prospects]. Moscow, 2025, № 1 (184), P. 53–63. EDN AUHJSB.

7. Adamtsevich L. A., Lapidus A. A. Organizatsionno-tekhnologicheskie resheniya pri upravlenii zhiznennym tsiklom obyektov stroitelstva v projektakh kompleksnogo razvitiya territoriy [Organizational and technological solutions in managing the life cycle of construction facilities within integrated territorial development projects]. Stroitelstvo : nauka i obrazovanie [Construction: Science and Education]. Moscow, 2025, Vol. 15, № 3, P. 176–188. DOI 10.22227/2305-5502.2025.3.11. EDN KSDBEB.

8. Lapidus A. A., Oleynik P. P. Obosnovanie protsessa vybora organizatsionno-tekhnologicheskikh resheniy [Justification of the process for selecting organizational and technological solutions]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo [Industrial and Civil Engineering]. Moscow, 2024, № 4, P. 70–74. DOI 10.33622/0869-7019.2024.04.70-74. EDN IHPPPR.

9. Oleynik P. P., Pakhomova L. A. Opredelenie organizatsionno-tekhnologicheskikh parametrov zhilykh zdaniy iz krupnogabaritnykh obemnykh blokov [Determination of organizational and technological parameters of residential buildings made from large volumetric blocks]. Real Estate: Economics, Management. Moscow, 2023, № 4, P. 55–59. DOI 10.22337/2073-8412-2022-4-55-59. EDN WLSQEE.

10. Eskaliev M. Zh. Metod obosnovaniya organizatsionno-tekhnologicheskikh resheniy pri maloetazhnom zhilishchnom stroitelstve [Method for justifying organizational and technological solutions in low-rise housing construction]. Stroitelnoe proizvodstvo [Construction Production]. Moscow, 2025, № 4. URL: <https://naukaru.ru/ru/nauka/article/106025/view?ysclid=mpdsf2xh6b588747765>.

11. Mukhametzyanov Z. R. Razvitie metodologii i teorii razrabotki organizatsionno-tekhnologicheskikh resheniy po stroitelstvu otraslevykh kompleksov [Development of methodology and theory for elaborating organizational and technological solutions for the construction of industrial complexes] : spetsialnost 05.23.08 Tekhnologiya i organizatsiya stroitelstva : diss. ... dok. tekhn. nauk ; Natsionalny issledovatel'skiy Moskovskiy gosudarstvennyy stroitelnyy universitet. Moscow, 2021, 293 p. EDN OXHXNH.

© З. Р. Мухаметзянов, Е. А. Султанова, М. З. Зарипов, А. А. Аллаяров, 2026
Получено: 04.03.2026 г.



УДК 691-405.8:666.3

И. В. БЕССОНОВ¹, канд. техн. наук, гл. науч. сотрудник; **А. Д. ЖУКОВ**, канд. техн. наук, доц.², вед. науч. сотрудник¹; **П. К. ГУДКОВ³**, ассистент; **Э. А. МАЛОВА**, аспирант кафедры строительного материаловедения², вед. инженер¹; **И. С. ГОВРЯКОВ**, аспирант кафедры строительного материаловедения², вед. инженер¹

ЛЕГКИЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

¹ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук»

Россия, 127238, г. Москва, Локомотивный пр-д, д. 21.

Тел.: (495) 482-40-76; эл. почта: niisf@niisf.ru

²ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Тел.: (495) 781-80-07; эл. почта: kanz@mgsu.ru

³ФГБОУ ВО «Финансовый университет при правительстве Российской Федерации».

Россия, 125993, г. Москва, пр-т Ленинградский, д. 49/2.

Тел.: (495) 249-52-49; эл. почта: academy@fa.ru

Ключевые слова: керамический материал, коэффициенты структуры, энергетическая эффективность, ячеистая структура, алюмосиликатные микросферы.

Конструкционно-теплоизоляционные материалы позволяют улучшить энергоэффективность зданий без применения дополнительных изоляционных элементов (слоистых систем), что особенно актуально для средней полосы и южных регионов. К подобным материалам относят ячеистые бетоны, а также материалы на основе различных легких и особолегких заполнителей и, в частности, легкие керамические изделия на основе алюмосиликатных микросфер.

Характеристики этого материала могут оцениваться коэффициентами структуры при известных значениях плотности, прочности и теплопроводности, которые несложно измерить в лабораторных условиях. С помощью коэффициентов структуры и объединенного оптимизационного критерия возможно решение задач повышения эксплуатационных качеств материала.

Введение

Существуют несколько способов повышения термического сопротивления оболочки здания. Одним из них является применение систем дополнительной изоляции, то есть использование составных слоистых конструкций с органическими или минеральными утеплителями. Также развивается направление использования эффективных легких теплых штукатурок, в том числе с применением гранулированных неорганических заполнителей. Третьим вариантом повышения термического сопротивления является использование в оболочке зданий конструкционно-теплоизоляционных материалов.

К подобным материалам относятся легкие керамические материалы, легкий бетон, а также материалы на особолегких заполнителях [1–3].



С учетом реалий отечественной строительной отрасли энергетическая эффективность строительных решений (конструкций и систем изоляции) оценивается как по показателям энергосбережения, так и по показателям комфортности, и по реальным затратам на весь цикл производства и применения материалов и окупаемости конструкций с применением таких материалов. С учетом высокой стоимости систем дополнительной изоляции и относительно невысокой стоимости теплоносителей окупаемость таких систем в средней климатической полосе и южнее практически невозможна. К примеру, стоимость одного м³ газа в Германии или Франции составляет 120–130 руб. (или 1455–1579 \$ за 1000 м³). Окупаемость систем дополнительной изоляции составляет в этих странах 15–20 лет. В России цена за газ составляет 8–10 руб./м³. Разница – в 12–15 раз, а следовательно, и срок окупаемости капитальных вложений в применение систем дополнительно теплосберегающей изоляции возрастает пропорционально.

Из этого следует, что применение конструкционно-теплоизоляционных материалов дает несомненное экономическое преимущество, улучшая при этом общую энергоэффективность здания.

Если для регионов с холодным климатом, в том числе Арктических и в Заполярье, применение композиционных (многослойных) систем изоляции является необходимостью, то для средней полосы и южных регионов допустимыми, с точки зрения достижения комфортности, становятся системы на основе легких и особолегких строительных материалов. Применение подобных решений упрощает конструкцию, снижает материальные затраты и поэтому привлекательно по финансовым показателям [4–6].

Материалы и методы

Классическим примером легких (теплоизоляционно-конструкционных) материалов являются материалы ячеистой структуры на основе минеральных вяжущих: газосиликат, газобетон, пенобетон, пенополистиролбетон, а также пеногипс и ячеистый жидкостекольный композит. В зависимости от полученных физико-технических характеристик и исследуемых эксплуатационных свойств каждого из материалов, подбирается его рациональная область применения [7–9].

Второй группой, представляющей несомненный интерес, являются легкие бетоны на легких или особолегких заполнителях: керамзите, аглопорите, дробленом пеностекле, минеральных гранулах или капсулах [10–12].

С точки зрения структуры, такие системы можно рассматривать как неоднородные или гетерогенные, состоящие из малых однородных областей (компонентов), разграниченных поверхностями раздела (рис. 1). Волокнистые структуры (рис. 1в) характерны для теплоизоляционных, звукоизоляционных материалов. Высокий процент открытой пористости обеспечивает высокую степень проницаемости таких материалов. В том случае, если межволоконное пространство заполняется непрерывной матрицей связующего вещества (на основе крахмала, гипсового вяжущего и т. д.), то возможно получение декоративно-акустических материалов. Для большинства теплоизоляционно-конструкционных материалов характерны ячеистые структуры в различных вариантах.

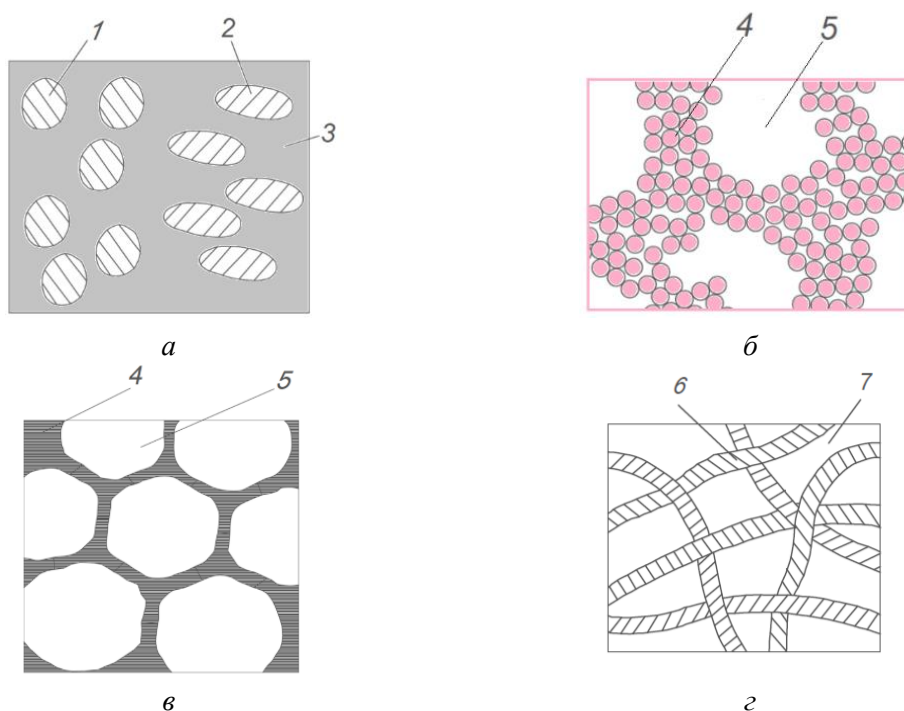


Рис. 1. Неоднородные системы: *а* – изолированные включения: изомерные (1) и анизотропно ориентированные (2) в однородной матрице (3); *б* – зернистые системы с однородной матрицей (4) и порами (5); *в* – ячеистые системы с однородной матрицей (4) и ячейками (5); *г* – волокнистые системы из волокон (6) и межволоконного пространства (7)

Подобные структуры определяют основные свойства легких (теплоизоляционно-конструкционных) материалов независимо от природы матрицы и наполнителя. Особенности этих структур в значительной степени характеризуют процессы переноса: массы и энергии. С точки зрения оценки макроструктурных особенностей пористых материалов удобно использовать определяющие их свойства коэффициенты. В практике применяют коэффициенты качества и структуры [12–15]. Для легких минеральных материалов, помимо волокнистой, характерной является ячеистая структура. Причем ячеистая структура может формироваться как за счет вспучивания пластичных смесей: холодного, или высокотемпературного, так и за счет введения в смеси особолегких заполнителей.

К таким особолегким заполнителям относятся: перлит, гранулированное пеностекло, вспученный вермикулит, а также алюмосиликатные микросферы. Размер микросфер колеблется в пределах 20–500 мкм, а толщина стенки составляет около 10 % от диаметра. По химическому составу алюмосиликатные микросферы можно представить следующим образом: SiO_2 – 55÷65 %; Al_2O_3 – 25÷33 %; Fe_2O_3 – 1÷6 %. Микросферы имеют насыпную плотность 320–360 кг/м³; прочность на гидростатическое сжатие при 50 % уровне разрушения составляет 150 кг/см² и теплопроводность 0,08–0,1 Вт/(м·К). Микросферы имеют невысокое водопоглощение; их сорбционные свойства представлены в табл. 1. За счет особенностей технологии получения алюмосиликатных микросфер, а именно условий высокотемпературного обжига,



заполнитель получается более эффективным для использования в качестве пористой микрогранулированной добавки при получении керамических изделий.

Таблица 1

Сорбционные свойства алюмосиликатных микросфер

| | | | | | |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Относительная влажность воздуха, % | 40 | 60 | 80 | 90 | 97 |
| Сорбционная влажность, % масс | 0,027 | 0,038 | 0,067 | 0,106 | 0,294 |

Для практической оценки качества структуры материала удобно использовать экспериментально определяемые в лабораторных условиях параметры: плотность (ρ , кг/м³), прочность (R , МПа) и теплопроводность (λ , Вт/(м·К)). На их основе рассчитываются коэффициенты структуры по прочности ($K_{СП}$) и теплопроводности ($K_{СТ}$):

$$K_{СП} = \frac{R}{(\rho - 116)^{1,12}} \text{ и } K_{СТ} = \frac{\lambda - 0,026}{\rho^{1,12}}. \quad (1)$$

В зависимости от области применения материала, при выборе можно основываться на показатели структуры, например, для ограждающих конструкций необходимы материалы с наибольшим коэффициентом структуры по прочности. Для наиболее точного показателя при подборе введен объединенный оптимизационный критерий:

$$K_{ОПТ} = \frac{K_{СП}}{K_{СТ}} = \frac{R}{(\lambda - 0,026) \left(1 - \frac{116}{\rho}\right)^{1,12}}. \quad (2)$$

Можно считать, что, чем выше объединенный оптимизационный критерий, тем выше качество материала, при учете возможных дополнительных условий. Выбор приоритетного коэффициента структуры определяется целевыми требованиями к материалу в зависимости от области применения: при необходимости минимальной теплопроводности ключевое значение приобретает $K_{СТ}$, тогда как для достижения максимальной прочности в качестве основного выступает $K_{СП}$ [16–17].

Изучение взаимосвязи структуры и свойств легкого материала осуществлялось на стеновом керамическом материале. Объектом исследования являлись керамические изделия на основе глины, модификаторов и алюмосиликатных микросфер. Обжиг глиняных образцов проводили по ступенчатому режиму: нагрев от 18 до 100 °С в течение 15 мин с последующей выдержкой при постоянной температуре 100 °С (10 мин); подъем температуры до 650 °С за 120 мин и выдержка при 650 °С (60 мин); дальнейший нагрев до 1050 °С (120 мин) и выдержка при конечной температуре (120 мин). Завершающим этапом являлось естественное охлаждение в печи изделия из пористой керамики.

Предметом исследования являлись характеристики обжигового керамического материала (табл. 2).



Таблица 2

Характеристики легких керамических изделий (ЛКИ)

| Марки- ровка состава | Плот- ность, кг/м ³ | Проч- ность, МПа | Водопог- лощение, % | Теплопро- водность, Вт/(м·К) | Коэффициенты | | |
|----------------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------|-----------|
| | | | | | $K_{СП} \cdot 10^3$ | $K_{СТ} \cdot 10^6$ | $K_{ОПТ}$ |
| ЛКИ-1 | 648 | 3,9 | 46,0 | 0,194 | 3,5 | 119,2 | 29 |
| ЛКИ-2 | 760 | 6,6 | 35,6 | 0,240 | 4,7 | 127,0 | 37 |
| ЛКИ-3 | 715 | 4,5 | 42,2 | 0,233 | 3,5 | 131,6 | 27 |
| ЛКИ-4 | 653 | 3,7 | 45,4 | 0,198 | 3,2 | 121,0 | 27 |
| ЛКИ-5 | 821 | 10,1 | 28,8 | 0,262 | 6,5 | 128,5 | 51 |
| ЛКИ-6 | 795 | 8,6 | 30,1 | 0,241 | 5,8 | 121,3 | 48 |
| ЛКИ-7 | 773 | 6,7 | 32,5 | 0,239 | 4,7 | 124,1 | 38 |

Результаты исследования

Обработка экспериментальных данных и расчет коэффициентов структуры показывает, что по объединенному оптимизационному критерию лучшие показатели у состава ЛКИ-5 ($K_{ОПТ} = 51$ и $K_{СП} = 0,65 \cdot 10^3$). Если есть необходимость в материале с наименьшим коэффициентом структуры по теплопроводности, то это состав ЛКИ-3. Введенные коэффициенты, например коэффициент структуры по теплопроводности учитывает структуру материала, включая форму, размеры, распределение пор и каркас матрицы. То есть, коэффициент учитывает не только теплопроводность материала, но и другие параметры структуры, влияющие на эту характеристику.

Поскольку теплопроводность материала в реальных условиях эксплуатации сильно зависит от его увлажнения, замеры проводились не только для сухих и полностью насыщенных водой образцов, но и для двух промежуточных состояний. Для этого часть образцов после сушки выдерживали месяц в помещении с влажностью 80 % (сорбционное увлажнение), затем производили измерение, а другую часть, предварительно насыщенную водой, сушили в том же помещении (процесс десорбции) в течение месяца, а затем аналогично производили измерения.

Теплопроводность практически линейно зависит от влажности. Установлено, что материалы на основе алюмосиликатных микросфер характеризуются низким влиянием увлажнения на теплопроводность: КТК (коэффициент теплотехнического качества) этих материалов не превышает 2–3 % на 1 % влажности. Для сравнения, у ячеистых бетонов и композитов на природных пористых заполнителях этот показатель достигает 4–7 %, у керамзитобетона – 4–6 %, т. е. в 2–3 раза выше (табл. 3).

Таблица 3

Теплофизические свойства материалов на основе глины (МСТ-3)

| | |
|--|---------|
| Средняя плотность, кг/м ³ | 715 |
| Теплопроводность в сухом состоянии, Вт/(м·К) | 0,233 |
| Максимальное водопоглощение, % | 42,70 |
| Теплопроводность при максимальном водопоглощении, Вт/(м·К) | 0,477 |
| Разница теплопроводности в сухом и максимально водонасыщенном состояниях, Вт/(м·К) | 0,244 |
| Приращение теплопроводности на процент увлажнения, Вт/(м·К) | 0,00571 |
| $КТК_{21} = (\lambda_a - \lambda_0) / (w_a \cdot \lambda_0)$, % | 2,5 |



Основная причина низких значений КТК на % влажности заключается в особенностях структуры и строения материала (рис. 1). Теплоперенос в материале осуществляется по принципу «связующее – микросфера – связующее – микросфера», так как основная часть связующего сосредоточена в контактных зонах микросферами. Благодаря этому композит наследует принцип работы слоистых эффективных теплоизоляционных конструкций.

Заключение

Конструкционно-теплоизоляционные материалы (плотность $D_{400-D1200}$, прочность $B_{2,5-B10}$) занимают особое место в современном строительстве. Их ключевое преимущество – способность выполнять одновременно прочностные и теплоизолирующие функции, то есть с возможностью их использования в несущих и самонесущих конструкциях, что позволяет возводить энергоэффективные здания с минимальным использованием систем утепления.

Для обоснованного выбора теплоизоляционных материалов целесообразно опираться на коэффициенты структуры по прочности и теплопроводности, отдавая предпочтение вариантам с наилучшим их соотношением, то есть с наибольшим $K_{СП}$ и наименьшим $K_{СТ}$. Предложенный оптимизационный критерий выступает эффективным инструментом такого выбора.

Исследования выполнены в рамках реализации НИР ФНИ Минстроя РФ «Развитие теоретических основ получения особо легких неорганических строительных материалов и исследование влияния пористой структуры на их теплофизические и акустические характеристики», а также в рамках реализации Программы развития НИУ МГСУ «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гагарин, В. Г. Макроэкономические аспекты обоснования энергосберегающих мероприятий при повышении теплозащиты ограждающих конструкций зданий / В. Г. Гагарин // Строительные материалы. – 2010. – № 3. – С. 8–16.
2. Лесовик, В. С. Строительные материалы и изделия : учебное пособие по направлению 270100 «Строительство» / В. С. Лесовик, А. М. Гридчин, Н. И. Алфимова. – Белгород : Изд-во БГТУ, 2011. – 222 с. – ISBN 978-5-361-00161-3.
3. Энергетическая эффективность строительных систем : монография / А. Д. Жуков, Е. Ю. Боброва, И. В. Бессонов, Е. А. Медникова. – Москва : ИНФРА-М, 2023. – 329 с. – (Научная мысль). – ISBN 978-5-16-017479-2 ; ISBN 978-5-16-110007-3. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/1897101>. – Текст : электронный.
4. Бессонов, И. В. Пеногипс в современном малоэтажном строительстве / И. В. Бессонов, А. Ф. Бурьянов // Жилищное строительство. – 2024. – № 5. – С. 26–34. – DOI <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-5-26-34>.
5. Прогнозирование водостойкости высокопористого материала на основе жидкого стекла / И. В. Бессонов, А. Д. Жуков, Э. А. Горбунова [и др.] // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2024. – № 2 (70). – С. 90–99. – EDN NIJLVK.
6. Моделирование структуры высокопористых материалов / И. В. Бессонов, А. Д. Жуков, И. С. Говряков, Э. А. Горбунова // Жилищное строительство. – 2024. – № 6. – С. 36–42. – DOI <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-6-36-42>. – EDN PFEGZX.
7. Лесовик, В. С. Энергоэффективные газобетоны на композиционных вяжущих для монолитного строительства / В. С. Лесовик, Л. А. Сулейманова, К. А. Кара // Известия



высших учебных заведений. Строительство. – 2012. – № 3. – С. 10–20.

8. Сапелин, А. Н. Сорбционные свойства стеновых материалов с применением микросфер / А. Н. Сапелин // Academia. Архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 101–104.

9. Сулейманова, Л. А. Влияние формы, размера пор и внешнего давления на среднюю плотность и прочность неавтоклавного ячеистого бетона / Л. А. Сулейманова, К. А. Кара // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2011. – № 2. – С. 71–77.

10. Иноземцев, А. С. Высокопрочные легкие бетоны : монография / А. С. Иноземцев, Е. В. Королёв ; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2022. – 192 с. – ISBN 978-5-9227-1265-1.

11. Гладких, И. В. Безобжиговые теплоизоляционные материалы на основе зольных микросфер из золотвала Западно-Сибирской ТЭЦ / И. В. Гладких, Е. П. Волюнкина // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 4. – С. 49–53.

12. Иноземцев, А. С. Легкие бетоны на полых и пористых заполнителях / А. С. Иноземцев, Е. В. Королёв // Строительные материалы. – 2024. – № 7. – С. 41–47. – DOI 10.31659/0585-430X-2024-826-7-41-47.

13. Сапелин, А. Н. Влияние структуры пустот на прочность силикатных строительных материалов / А. Н. Сапелин, Н. А. Сапелин // Строительные материалы. – 2011. – № 5. – С. 44–48. – EDN OBNCKZ.

14. Сапелин, А. Н. Коэффициенты структуры как критерий оценки теплотехнического качества строительных материалов / А. Н. Сапелин, И. В. Бессонов // Строительные материалы. – 2012. – № 6. – С. 26–28. – EDN PCFYAN.

15. Weber, H. Porobeton Handbuch. Planen und Bauen mit System / H. Weber, H. Hullmann. – Gtersloh : Bertelsmann Springen Bauverlag, 2002. – 278 p.

16. Иноземцев, А. С. Модель высокопрочного легкого бетона / А. С. Иноземцев, Е. В. Королёв // Строительные материалы. – 2024. – № 12. – С. 34–41. – DOI 10.31659/0585-430X 2024-831-12-34-41.

17. Lagoz, A. Influence of the fly ash properties on properties of autoclaved aerated concrete / A. Lagoz, P. Szymanski, P. Walczak // Cement wapno beton. Special issue : 5th International conference on autoclaved aerated concrete “Securing a sustainable future” to be held at Bydgoszcz to celebrate 60 years of AAC experience in Poland, 14–17 september 2011 / University of technology and life Ssciences. – Bydgoszcz, 2011. – P. 22–25.

BESSONOV Igor Vyacheslavovich¹, candidate of technical sciences, chief researcher; ZHUKOV Aleksey Dmitrievich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of construction materials², leading researcher¹; GUDKOV Pavel Kirillovich³, assistant; MALOVA Elina Aleksandrovna, postgraduate student of the chair of construction materials ², leading engineer¹; GOVRYAKOV Ilya Sergeevich, postgraduate student of the chair of construction materials ², leading engineer¹

LIGHTWEIGHT CERAMIC MATERIALS AND THEIR STRUCTURAL CHARACTERISTICS



¹Research Institute of Building Physics Russian Academy of Architecture and Constructions Sciences.

21, Lokomotivny Proezd, Moscow, 127238, Russia.

Tel.: (495) 482-40-76; e-mail: niisf@niisf.ru

²Moscow State University of Civil Engineering.

26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, Russia.

Tel.: (495) 781-80-07; e-mail: kanz@mgsu.ru

³Financial University under the Government of the Russian Federation.

49/2, Leningradsky Prospect, Moscow, 125993, Russia.

Tel.: (495) 249-52-49; e-mail: academy@fa.ru

Key words: ceramic material, structural coefficients, energy efficiency, cellular structure, aluminosilicate microspheres.

Structural and thermal insulation materials enhance the energy efficiency of buildings without using additional insulating elements (layered systems), which are especially relevant for temperate and southern climate zones. Such materials include cellular concrete, as well as materials based on various light and extra-light aggregates, and lightweight ceramic products based on aluminosilicate microspheres.

The characteristics of this material can be estimated by the coefficients of the structure with known density, strength and thermal conductivity, which are easy to measure in the laboratory. These structural coefficients can be combined with a unified optimization criterion to effectively address material performance optimization challenges.

REFERENCES

1. Gagarin V. G. Makroekonomicheskie aspekty obosnovaniya energosberegayushchikh meropriyatiy pri povyshenii teploshchity ograzhdayushchikh konstruktsey zdaniy [Macroeconomic aspects of substantiating energy-saving measures when improving the thermal protection of building envelopes]. Stroitelnye materialy [Building Materials]. Moscow, 2010, № 3, P. 8–16.
2. Lesovik V. S., Gridchin A. M., Alfimova N. I. Stroitelnye materialy i izdeliya [Building materials and products]. Belgorod, Izd-vo BG TU, 2011, 222 p.
3. Zhukov A. D., Bobrova E. Yu., Bessonov I. V., Mednikova E. A. Energeticheskaya effektivnost stroitelnykh sistem [Energy efficiency of building systems]. Moscow, INFRA-M, 2023, 329 p. URL: <https://znanium.com/catalog/product/1897101>.
4. Bessonov I. V., Burianov A. F. Penogips v sovremennom malotazhnom stroitelstve [Foam gypsum in modern low-rise construction]. Zhilishchnoe stroitelstvo [Housing Construction]. Moscow, 2024, № 5, P. 26–34. DOI <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-5-26-34>.
5. Bessonov I. V., Zhukov A. D., Gorbunova E. A., [et al.] Prognozirovanie vodostoykosti vysokoporistogo materiala na osnove zhidkogo stekla [Predicting the water resistance of a highly porous material based on liquid glass]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhny Novgorod, 2024, № 2 (70), P. 90–99. EDN NIJLVK.
6. Bessonov I. V., Zhukov A. D., Govryakov I. S., Gorbunova E. A. Modelirovanie struktury vysokoporistyykh materialov [Modeling the structure of highly porous materials]. Zhilishchnoe stroitelstvo [Housing Construction]. Moscow, 2024, № 6, P. 36–42. DOI <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-6-36-42>. EDN PFEGZX.
7. Lesovik V. S., Suleymanova L. A., Kara K. A. Energoeffektivnye gazobetonny na kompozitsionnykh vyazhushchikh dlya monolitnogo stroitelstva [Energy-efficient aerated concretes on composite binders for monolithic construction]. Izvestiya vysshykh uchebnykh



zavedeniy. Stroitelstvo [Izvestiya of Higher Education Institutions. Construction]. Novosibirsk, 2012, № 3, P. 10–20.

8. Sapelin A. N. Sorbtsionnye svoystva stenovikh materialov s primeneniem microsfer [Sorption properties of wall materials using microspheres]. Academia. Arkhitektura i stroitelstvo [Academia. Architecture and Construction]. Moscow, 2013, № 3, P. 101–104.

9. Suleymanova L. A., Kara K. A. Vliyanie formy, razmera por i vneshnego davleniya na srednyuyu plotnost i prochnost neavtoklavnogo yacheistogo betona [Influence of pore shape, size and external pressure on the average density and strength of non-autoclaved aerated concrete]. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova [Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov]. Belgorod, 2011, № 2, P. 71–77.

10. Inozemtsev A. S., Korolev E. V. Vysokoprochnye lyogkie betony [High-strength lightweight concretes]. Saint Petersburg, SPbGASU, 2022, 192 p.

11. Gladkikh I. V., Volynkina E. P. Bezoobzhigovye teploizolyatsionnye materialy na osnove zolnykh microsfer iz zoloatvala Zapadno-Sibirskoy TETS [Non-fired thermal insulation materials based on ash microspheres from the ash dump of the West Siberian Thermal Power Plant]. Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. Novokuznetsk, 2008, № 4, P. 49–53.

12. Inozemtsev A. S., Korolev E. V. Lyogkie betony na polykh i poristyykh zapolnitelyakh [Lightweight concretes on hollow and porous aggregates]. Stroitelnye materialy [Building Materials]. Moscow, 2024, № 7, P. 41–47. DOI 10.31659/0585-430X-2024-826-7-41-47.

13. Sapelin A. N., Sapelin N. A. Vliyanie struktury pustot na prochnost silikatnykh stroitelnykh materialov [Influence of void structure on the strength of silicate building materials]. Stroitelnye materialy [Building Materials]. Moscow, 2011, № 5, P. 44–48. EDN OBHCKZ.

14. Sapelin A. N., Bessonov I. V. Koeffitsienty struktury kak kriteriy otsenki teplotekhnicheskogo kachestva stroitelnykh materialov [Structural coefficients as a criterion for evaluating the thermal engineering quality of building materials]. Stroitelnye materialy [Building Materials]. Moscow, 2012, № 6, P. 26–28. EDN PCFYAN.

15. Weber H., Hullmann H. Porobeton Handbuch. Planen und Bauen mit System [Aerated concrete manual. Planning and building with a system]. Gütersloh, Bertelsmann Springen Bauverlag, 2002, 278 p.

16. Inozemtsev A. S., Korolev E. V. Model vysokoprochnogo lyogkogo betona [Model of high-strength lightweight concrete]. Stroitelnye materialy [Building Materials]. Moscow, 2024, № 12, P. 34–41. DOI 10.31659/0585-430X-2024-831-12-34-41.

17. Lagosz A., Szymanski P., Walczak P. Influence of the fly ash properties on properties of autoclaved aerated concrete. Cement wapno beton. Special issue: 5th International conference on autoclaved aerated concrete “Securing a sustainable future” to be held at Bydgoszcz to celebrate 60 years of AAC experience in Poland, 14–17 september 2011. University of Technology and Life Sciences. Bydgoszcz, 2011, P. 22–25.

© И. В. Бессонов, А. Д. Жуков, П. К. Гудков, Э. А. Малова, И. С. Говряков,
2026

Получено: 02.03.2026 г.



УДК 656.024:691.54

Н. В. РОЗАНЦЕВА, канд. техн. наук, доц. кафедры организации строительства; **А. Д. ДРОЗДОВ**, доц., канд. техн. наук, доц. кафедры организации строительства

ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННАЯ КОНЦЕПЦИЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ И СКЛАДИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА В СИЛОСЫ

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Тел.: (812) 317-80-41; эл. почта: prozanceva@lan.spbgasu.ru

Ключевые слова: строительство, логистика, методы разгрузки, пневматические и шнековые системы подачи, силосы.

В работе исследованы методы транспортировки цемента из вагонов-хопперов в силосы, включая традиционные, пневматические, конвейерные и шнековые системы. Проанализированы их преимущества и недостатки.

Предложены рекомендации по оптимизации процессов, сочетающие пневматические и механические методы с автоматизированными технологиями. Рассчитаны параметры для непрерывной работы комплекса. Внедрение этих решений повысит производительность, улучшит экономические показатели предприятий и снизит негативное воздействие на окружающую среду.

Введение

Развитие страны зависит от роста регионов, который невозможен без динамичного развития строительной сферы. Качественное и своевременное снабжение стройматериалами (*песок, щебень, цемент*) определяет сроки и качество работ. Эффективное управление цепями поставок включает выбор транспорта, оптимизацию маршрутов и контроль запасов. Организация хранения и распределения больших объемов сыпучих материалов критически важна для успешной реализации проектов, железнодорожный транспорт способен обеспечить бесперебойную доставку [1], а грамотная организация эффективных систем хранения и распределения цемента снижают риски и способствуют укреплению экономики. Однако при неправильной организации это может ухудшить экологическую обстановку. Учет экологических требований и современные решения позволяют сократить потери и загрязнение окружающей среды. Таким образом, оптимальная система хранения и распределения цемента обеспечивает стабильное развитие строительной отрасли и улучшает экологическую ситуацию в стране. *Исследование посвящено разработке рекомендаций по проектированию высокопроизводительной системы разгрузки и хранения сухих смесей, повышающей надежность, экологичность и экономичность, а также минимизирующей потери и улучшающей качество продукции, проанализированы существующие методы транспортировки и хранения смесей и предложен наиболее эффективный вариант оптимизации.*



Предмет исследования – основные проблемы при перевалке сухих смесей из железнодорожного транспорта в силосные емкости и хранения, напрямую влияющие на качество и организацию материально-технического обеспечения стройплощадок. **Объект исследования** – технологические схемы и устройства, хранения и распределения.

Материалы и методы

Прием и перекачка цементных смесей – ключевой этап от разгрузки до хранения в силосах, влияющий на качество продукции и экономичность. Наиболее эффективна доставка железнодорожным транспортом. Успешное складирование требует удобных подъездных путей и зон разгрузки, правильного размещения резервуаров, защиты от влаги и пыли, регулярного обслуживания оборудования.

Для повышения производительности технологическая система должна рассматриваться как единый комплекс взаимосвязанных элементов.

Анализ исходных условий хранения и распределения цемента состоит из следующих ключевых компонентов:

1) система транспортировки:

– вагоны-хопперы объемом 55–72 м³, грузоподъемностью 67–79,5 т, средней длиной 11,92 м; *детальное проектирование на основе сбора и анализа параметров входящего потока (объемы, интенсивность поставок [2]);*

– узлы разгрузки: *граничные условия площадки (грунтовые воды, планировка, энергоемкость);* целевой показатель: *время разгрузки ≤ 40 мин;* основные проблемы *приямка (гидроизоляция, вибрации, целостность);* включают приемные бункеры (приямки или подкатные лотки) объемом 36 м³, площадью 24 м² и глубиной *приямка 5,8 м.* Бункеры оснащены вибраторами и затворами (ручного или пневматического типа). Разгрузка осуществляется механически (*с помощью устройств*), пневматически (*сжатым воздухом*) или комбинированно (*винтовыми компрессорами*) [3];

– *транспортные системы (аэрожелоба, вакуумные и пневматические насосы);* распределительная система (механические (шнековые конвейеры, нории) и пневматические конвейеры, а также их комбинации); дозаторы для выдачи цемента. Автоматика управляет задвижками с пневмоприводом.

2) *система хранения:* силосы емкостью 520–700 т, высотой в среднем 25–27,5 м, при отношении высоты к диаметру $\leq 5D$;

3) *вспомогательные системы:* компрессорное оборудование для подачи сжатого воздуха, аспирация и фильтрация для удаления пыли, автоматизированная система управления (АСУ ТП) [4] с контролем давления воздуха, сигналов наполнения и вибраторами при неполадках.

Загрузка цементовозов выполняется из крайних силосов с помощью шнекового транспортера и телескопического загрузчика.

Проблемы переработки и хранения сухих строительных смесей распространены на предприятиях отрасли и связаны с рядом промышленных рисков [5]. Их успешное преодоление требует комплексного подхода. На основании обобщения опыта, ранее полученного при проектировании и строительстве в Казахстане, Чечне, на Яковлевском руднике и в Ленинградской области, была составлена методика проведения исследований: *системный анализ; проведение сравнительного моделирования систем хранения;* акцент на *компромиссном выборе*, рассмотрение системы как целостного комплекса, где «слабое звено» может нивелировать



преимущества самого производительного основного оборудования; *составление последовательности этапов.*

Выявлены основные проблемы: негативное воздействие грунтовых вод, осадков, агрессивных веществ, промерзание и выпучивание; ограниченное пространство и сложность обслуживания; повышенные требования к надежности; образование пыли при перевалке; коррозия и износ металлических конструкций под действием влаги, пыли и гидравлических ударов. Для эффективного хранения и быстрой выдачи цемента большими объемами с минимальной нагрузкой на персонал и сроком обслуживания предполагается следующий режим работы: количество рабочих дней по приему материала – 264–240 дней в году; рабочих дней по выдаче – 132–100 дней в году; продолжительность одной смены – 8 часов. На основании ранее перечисленных основных проблем, включая перегрузку фундаментов, приводящую не только к нагрузке на боковые стенки, но и износу покрытий с образованием трещин, и предлагаемых решений для фундаментов и стен бетонных прямков под приемку цемента с железнодорожных составов составлена табл. 1.

Таблица 1

Основные проблемы и предлагаемые решения

| Область проблемы | Возможные проблемы | Предлагаемые решения |
|----------------------------------|---|---|
| Структурная целостность | Динамические нагрузки, вызывающие трещины; местное смятие бетона под балками | Тщательный анализ динамических нагрузок; опорные плиты под балки; бетон высокой марки с армированием |
| Гидроизоляция, дренаж, утепление | Проникновение грунтовых вод; гидростатическое давление; повреждение гидроизоляции, выпор прямка, и промерзание стенок | Комплексные системы внешнего и внутреннего дренажа; качественная гидроизоляция с проникающими составами, применение модифицирующих добавок, «Пеноплекс ГЕО» [6] |
| Вибрация и устойчивость | Передача вибрации; разжижение грунта; долговременная осадка | Виброизоляция балок; детальное геотехническое исследование; использование свайных фундаментов |

Обеспечить надежное функционирование прямков для приема цемента из железнодорожных составов можно путем внедрения следующих решений¹:

- структурная целостность обеспечивается применением прочного бетона и точной проектной проработкой узлов крепления;
- водонепроницаемость достигается устройством внешнего дренажа, внутреннего водосбора и специальной обработкой поверхностей;
- управление вибрациями осуществляется установкой виброизолирующих прокладок и проведением геотехнического анализа.

¹ Емкости для сыпучих грузов в транспортно-грузовых системах/ И. В. Горюшинский, И. И. Кононов, В. В. Денисов, Е. В. Горюшинская, Н. В. Петрушкин. Под общей редакцией И. В. Горюшинского: Учебное пособие. – Самара: СамГАПС, 2003. – 232с.



Осуществлен выбор и расчет пролетных балок для рельсового пути над приямком для установки передвижного состава. Система балок принимается в зависимости от габаритов приямков, количества одновременно поставленных под разгрузку вагонов-хопперов, технологического оборудования: расчет производился исходя из нагрузок – 100 кН/м, с учетом установки двух 4-осных крытых вагонов-хопперов для цемента, модель 11–715; грузоподъемность – 67 т; масса тары вагона – 18,5 т; объем кузова – 55 м³, длина пролета 23,45 м; материала балки и ее механических характеристик, в качестве образцов были отобраны балки: 60Ш1² ГОСТ Р 57837–2017, 60Ш4³ и 50Ш4⁴.

Расчетные напряжения в выбранных балках составили для балки 60Ш1–194МПа, 60Ш4–119МПа, 50Ш4–179МПа. Распределенная нагрузка на каждую пару из 4-х осей вагона-хоппера модели 11–715–171 т. Расчет показал, что все балки выдерживают эксплуатационную нагрузку, но с учетом возможных вариантов вагонов-хопперов и необходимого запаса прочности 30–35 % оптимальным выбором является балка 60Ш4. Рекомендуется постоянный мониторинг состояния конструкции.

Выбор базовой технологической схемы:

- *ключевые критерии*: объем перевозок, расстояние, условия производства;
- *решающие правила*: при объеме > 500 т/сут и расстоянии > 70 м – комбинированная схема; для скорости разгрузки ≤ 40 мин/вагон обязательны: источник воздуха (15 м³/мин), аэрация конусов, 2 приемных насоса;
- оборудование*: пневмовинтовые и пневмокамерные насосы (табл. 2), винтовые конвейеры, ленточные или цепные нории – по требуемой производительности;
- *методы разгрузки*: традиционный (приямок с бункерами), механический (шнеки), комбинированный, редко гидравлический;
- *транспортировка*: механические системы – для малых расстояний, пневматические – для дальних.

Современный тренд – гибридные решения и интеллектуальные системы управления, позволяющие оптимизировать процессы и предсказывать износ оборудования с точностью до 85 %.

² <https://23met.ru/spravka/balka/60%D0%A81?g=%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2%20%D0%A0%2057837-2017>

³ <https://23met.ru/spravka/balka/60%D0%A84?g=%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2%20%D0%A0%2057837-2017>

⁴ Размеры – Балка 50Ш4



Таблица 2

Способы транспортировки цемента из приемных бункеров в силосы [7]

| Характеристика | Пневматическая транспортировка | Механическая транспортировка | Комбинированные |
|----------------------------|---|--|---|
| Средства транспортировки | Потоки сжатого воздуха | Шнековые; ленточные, винтовая подача или разгрузка с подкатных шнековых конвейеров | Выгрузка самотеком в шнековый конвейер, подача в расходный бункер, транспортировка сжатым воздухом по пневмомагистрали |
| Основные преимущества | Простота установки, высокая надежность | Низкие строительные и эксплуатационные расходы | Снижение энергопотребления на 25–30 % |
| Производительность | От 0 до 300 т/ч | До 200 т/ч | Зависит от вида материала и работы шнека, до 250 т/ч |
| Максимальная дистанция | Горизонтальное и наклонное перемещение | До 40 м, экономия до 40 % по сравнению с пневматическими | До 75 м вертикально; свыше 100 м пневмотранспорт |
| Экологическая безопасность | Закрытая система, снижает пыль (рукавные фильтры с импульсной продувкой и аспирацией и рециркуляцией воздуха) | Возможна повышенная запыленность | Минимализация пылевых выбросов, экономия энергии, уменьшают уровень шумового загрязнения |
| Особенность технологии | Использование прямка, пневмонасос под разгружаемым вагоном. Закрытость системы, малоэнергоёмки | Прямая доставка, отсутствие износа | Частичное использование подрельсового прямка, разгруз из-под вагона шнековым транспортером, сложности с уровнем подземных вод |
| Пример оборудования | Камерные и винтовые пневмонасосы | Конвейеры, элеваторы | Вакуумные насосы, транспортировочные трубы, механические устройства |

Продуктивность пневмотранспорта зависит от характеристик системы. Материал из бункера подается в насос, разрыхляется и аэрируется сжатым воздухом, транспортируется по трубопроводу в силос без расслоения. Ключевое значение имеет правильный выбор насоса. Сравним три основных способа: пневмокамерные и пневмовинтовые насосы. (см. табл. 3, рис. 1), используемых для этих целей [8], и шнековые конвейеры.



Таблица 3

Сравнение технических решений для разгрузки цемента

| Параметр | Пневмовинтовые насосы [9] | Пневнокамерные насосы [10] | Шнек + Нория (гравитационно-поточный метод) |
|--------------------------------|---|---|--|
| Принцип работы | Винтовая передача | Периодическое нагнетание воздуха | Механическое перемещение шнеком, подъем ковш. элеватором |
| Ключевое оборудование | Пневмовинтовой насос | Прием. бункер, шнековые питатели (Ø 273 мм, 70 м³/ч), пневнокамерные насосы ACCU (2 шт., 1,5 м³), система аспирации, управления ПЛК | Шнековый питатель (винтовой конвейер), ковшовый элеватор (нория) |
| Производительность | От низкой до средней. Широкая вилка (7–80 т/ч), (от модели) | Высокая (до 200 т/ч) | Средняя и высокая (30–150 т/ч) |
| Контроль точности дозы | Хороший контроль | Менее точный | Не предусмотрен |
| Энергопотребление | Очень высокое (электропривод шнека 10–37 кВт + воздух) | Высокое (0,8–1,2 кВт·ч/т), требует сжатого воздуха | Низкое (0,3–0,5 кВт·ч/т) |
| Преимущества | Относительная простота | Высокая степень автоматизации; эффективная подача на расстоянии; герметичность процесса, минимальное пыление | Простота, надежность; отсутствие цикличности в работе, наименьшие первоначальные затраты |
| Недостатки / Проблемы | Высокое энергопотребление; сильное пыление | Цикличность работы; требуется два насоса; более высокие эксплуатационные затраты, вибрация | Большие эксплуатационные затраты, нет регулировки, пыление, возможна сегенерация смеси |
| Применение / Опыт эксплуатации | Применялась в Казахстане. Отмечена проблема пыления, за счет выхлопа в обратную сторону | Применялась на Яковлевском руднике. Техническое решение от <i>ENS Group</i> | Применялась в Гудермесе (Чечня). Простое и проверенное механическое решение |



Предпоследний этап – подача смеси из бункера по трубам насосами в загрузочный лоток нории, подъем к выгрузке: *выгрузка из нории*: материал поднимается в ковшах и поступает в разгрузочную воронку; *направление в силосы*: из воронки материал поступает: самотеком – если силосы под норией; конвейерами – для удаленных силосов; через шиберы – для распределения потока.

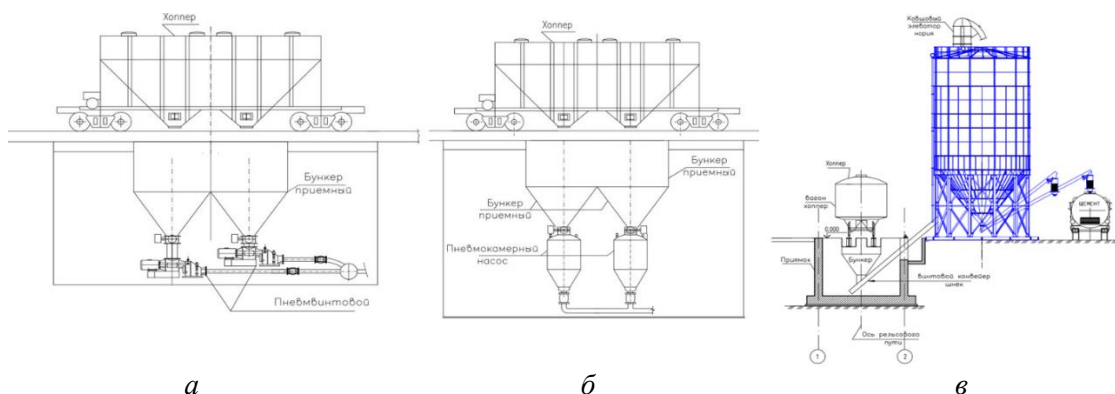


Рис. 1. Технические решения для разгрузки цемента: *а* – пневмовинтовой насос; *б* – пневмокамерный; *в* – шнек+нория

Система оснащается приводом (электродвигатель и редуктор). Ниже представлена сравнительная таблица основных видов норий (табл. 4).

Возможные проблемы и недостатки норий: механические повреждения: дробление материала, износ и повреждение ковшей; нарушение качества: неравномерная загрузка, сегрегация смеси, образование пыли; эксплуатационные трудности: высокий износ, значительные энергозатраты, сбои в подаче, перегрузки или недогрузки.

Заключительный этап – распределение по силосам. Силос – цилиндрическая емкость из прочных металлических сплавов с автоматической системой управления, фильтрацией, вентиляцией, виброустройствами против зависания и системами загрузки/разгрузки. Объем силоса определяется суточной потребностью в цементе⁵. *Конструктивные особенности*: методы сборки: рулонная, листовая, комбинированная⁶; для объемов свыше 200 тыс. м³ рулонная сборка не применяется; горизонтальные швы – двусторонние, толщина стенки – 8–40 мм (дифференцирована по высоте).

Риски: нарушение целостности при неправильном проектировании [12], разрушение материала из-за ударов, сегрегация, пылеобразование, поломки и износ оборудования.

⁵ Хранение компонентов CCC: силосы, влагозащита, FIFO

⁶ СП 359.1325800.2017 «Силосы стальные вертикальные цилиндрические для хранения сыпучих продуктов. Правила проектирования» / Минстрой России



Таблица 4

Виды норий

| Вид нории | Характеристики | Преимущества | Недостатки |
|----------------------|---|--|--|
| Ленточная нория [11] | Передача груза лентой с прикрепленными ковшами. Используются ковши открытого типа, для малых перегрузок | Ценовая доступность. Скорость ленты регулируется мотор-редуктором. Простота в установке, легкость обслуживания | Невысокая грузоподъемность. Вероятность разрыва ленты при нагрузках |
| Цепная нория | Груз передается цепью с жестко закрепленными ковшами. Используется закрытая цепь с кольцами | Большая грузоподъемность. Устойчивость к высоким нагрузкам. Удобна для крупнокузовых грузов | Трудоемкость в обслуживании цепи. Повышенный износ элементов цепи. Дороже ленточных аналогов |
| Модульная нория | Гибрид ленточной и цепной конструкции, легко модернизируется | Универсальна. Средняя цена. Легко адаптируется. Высокая надежность, легкая смена модулей | Необходима постоянная диагностика модуля. Ограничение высоты подъема. Цена выше средней |
| Шахтная нория | Применяется для высокоэффективного вертикального подъема крупных партий материала | Компактность. Защищена от внешней среды. Предназначена для сложных производств. Высокий ресурс работы | Сложность диагностики скрытых дефектов. Опасность застревания материала. Цена выше средних показателей |

Результаты

Интеграция и оценка эффективности. Эффективность разгрузки хоппера за 40 минут достигается при расходе воздуха не менее 15 м³/мин, давлении 2–3 атм, ресивере 10 м³ и двух насосах (по числу конусов). На производительность также влияют параметры материалопровода и аспирационного фильтра. *Выбор системы перекачки* – баланс инвестиций, эксплуатации и экологии: *пневмовинтовой насос*: высокие энергозатраты и износ, оправдан при непрерывной подаче (например, *Monjus*): надежен, прост, низкие эксплуатационные расходы, но цикличен); *ленточный конвейер*: для больших объемов и дальних расстояний, пыление; *шнековый питатель*: компактен, закрытого типа исключает пыление, но ограничен по объему и энергозатратен; *ковшовый элеватор*: эффективен для подачи в силосы, но шумный и громоздкий; *виброаэраторы*: предотвращают зависание, но энергозатратны; *аспирационная система*: улучшает условия труда, увеличивает расходы на обслуживание.

Максимальная эффективность достигается комбинацией оборудования, компенсирующей недостатки отдельных узлов. Дополнительные требования:



защита фундаментов приямков от грунтовых вод; разгонный участок трубопровода (~ 5 м), минимальное число поворотов (радиус $\geq 1,5$ м); производительность компрессора и фильтра: не менее $24,75 \text{ м}^3/\text{мин}$ (с учетом коэффициента неравномерности 1,5); компрессоры с частотным регулированием, ресивер 3600 л, осушитель воздуха (точка росы $+3^\circ\text{C}$). Оптимизация процесса: герметичные системы, пылеулавливающие фильтры, орошение, автоматизация, контроль влажности и температуры, аспирация. *Функционально-стоимостной анализ*: поиск баланса между капитальными вложениями, эксплуатационными расходами и технологическими требованиями. Разработка алгоритма выбора комплектации на основе технологической схемы разгрузки (см. рис. 2).

Этап 1: Предпроектный анализ и определение граничных условий

Анализ входящих потоков: максимальная длина состава, пиковая/среднесуточная потребность (т/ч, т/сут), интенсивность поставок, режим работы склада. Анализ площадки и инфраструктуры: уровень грунтовых вод, проект гидроизоляции, расстояние до силосов (L , м), перепад высот (H , м), электрическая мощность, параметры воздушных магистралей; экологические и эксплуатационные нормы: ПДК пыли, уровень шума. Характеристики материала: тип смеси – сыпучесть, абразивность, склонность к аэрации и слеживанию. Экономические и ресурсные ограничения: бюджет, эксплуатационные расходы, наличие квалифицированного персонала. На основе Фазы 1 выбирается основной метод.

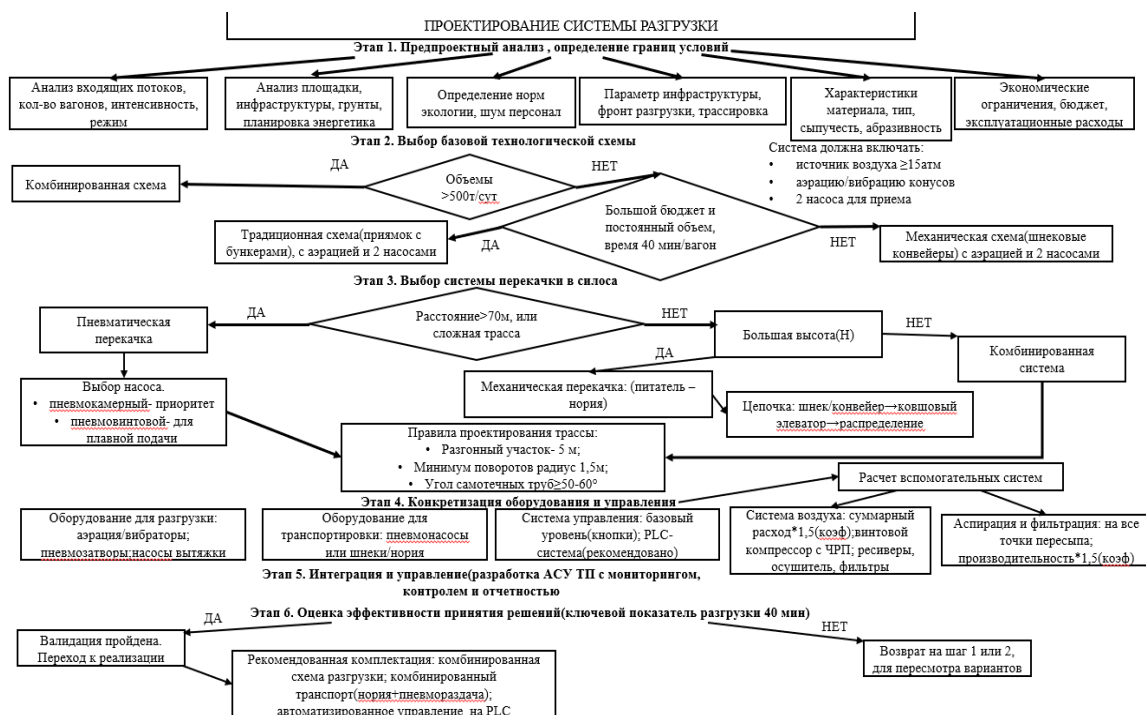


Рис. 2. Алгоритм проектирования систем разгрузки



Этап 2: Выбор базовой технологической схемы (см. табл. 5) [13]

Таблица 5

Выбор базовой технологической схемы разгрузки вагона-хоппера

| Критерий | Традиционный (прямоук с бункерами) | Механический (шнековые конвейеры) | Комбинированный | Гидравлический (редко) |
|----------------------|---|--|---|--|
| Объем перевозок | Средние и большие | Малые и средние | Средние и большие | Спец. задачи (очистка) |
| Скорость разгрузки | Средняя (зависит от выгрузки) | Высокая для прямого потока | Максимальная (совмещает плюсы) | Низкая |
| Расстояние до силоса | Любое (транспорт из бункера) | Короткое (ограничено длиной шнека) | Любое | Неприменимо |
| Кап. затраты | Высокие (прямоук) | Низкие/ средние | Высокие | Средние |
| Гибкость | Низкая (по месту) | Высокая (мобильность) | Средняя | Низкая |
| Рекоменда- ция | Для постоянных больших объемов с развитой стац. инфраструктурой | Для малых баз, сезонных работ, ограниченного бюджета | Для производственных терминалов. Часто: нижняя разгрузка на ленту + аэрация. | Для полной очистки или специфических материалов |

Вывод по 2 этапу: приоритетными являются комбинированные или высокопроизводительные схемы с аэрацией (вибраторы, пневмоподушки).

Этап 3: Выбор системы перекачки от приемного узла к силосам (поиск компромисса): подбор оборудования как единой системы (бункер, шнек), в силос (табл. 6).

Таблица 6

Выбор системы транспортировки от места разгрузки к силосу [14]

| Критерий / Способ | Пневматический (напорный/вакуумный) | Механический (нория+шнеки) | Комбинированный (чаще всего) |
|----------------------|--|---|---|
| Расстояние (L) | Большое (> 100 м), сложная трасса | Короткое ($< 50-70$ м), прямая линия | Среднее, с переходами |
| Высота (H) | Любая | Любая (нория) | Любая |
| Пыльность | Низкая (замкнутый контур) | Высокая (требует аспирации) | Контролируемая |
| Энергозатраты | Высокие | Низкие | Средние |
| Гибкость | Высокая (гиб. рукава) | Низкая (жесткая трасса) | Средняя |
| Типовое решение | Пневмокамерный насос или винтовой компрессор + пневмовинтовой. Требование: $15 \text{ м}^3/\text{мин}$, $2-3 \text{ атм}$, ресивер 10 м^3 | Приемный шнек – ковшовый элеватор (нория) – распределительный шнек по силосам | Нория поднимает материал, а далее пневмотранспорт распределяет по силосам |

В качестве основного транспортирующего механизма принята нория, обеспечивающая подачу материала в силосы и их разгрузку. Для минимизации воздействия на прирельсовый прямок выполнено геотехническое моделирование. На основе данных о непрерывном производстве (1000 т), 10-суточном запасе (9000 т) и насыпной плотности ($1,1 \text{ т/м}^3$) определены параметры двух силосов: высота – 27,5 м, диаметр – 8 м. Построены изополя осадок (рис. 3) основания (суглинок) с учетом срока эксплуатации ≥ 20 лет.

Краткое техническое резюме:

Зона влияния: минимальное расстояние от силосов до прямка – 29,4 м (*осадка* $> 5 \text{ мм}$); **транспортировка:** $L > 70$ м или сложная трасса: пневматическая перекачка, приоритет: пневмокамерный насос (*Monjus*) – надежность, низкие расходы; альтернатива: пневмовинтовой – непрерывная подача (*высокие затраты*); $L < 70$ м, значительный подъем: механическая схема: Питатель → Нория → Распределение. Вертикаль: нория; горизонталь: шнек или ленточный конвейер в укрытии (*для цемента*). Распределение: самотек (*шиберы*) или короткие шнеки/пневмозатворы; **проектирование трассы:** разгонный участок: ~ 5 м; минимум поворотов, радиус $\geq 1,5$ м; угол наклона самотека: $50\text{--}60^\circ$.

Комплекс включает ж/д пути, БСУ, хранилище, временную инфраструктуру. Угол подачи $45\text{--}60^\circ$. Автоматизация управления (рис. 4).

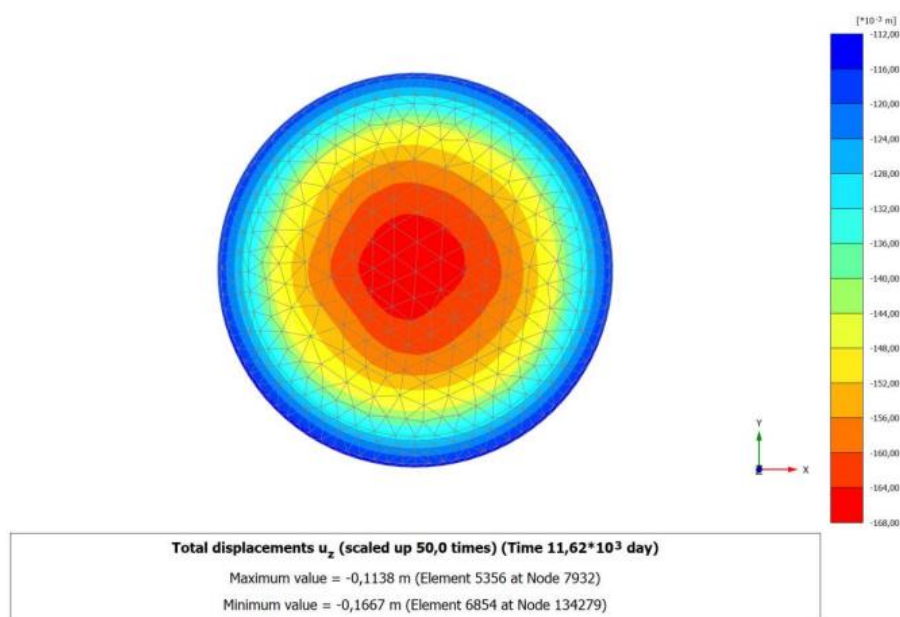


Рис. 3. Изополя итоговых осадок силоса за время эксплуатации (20 лет), выполнено в PLAXIS 3D

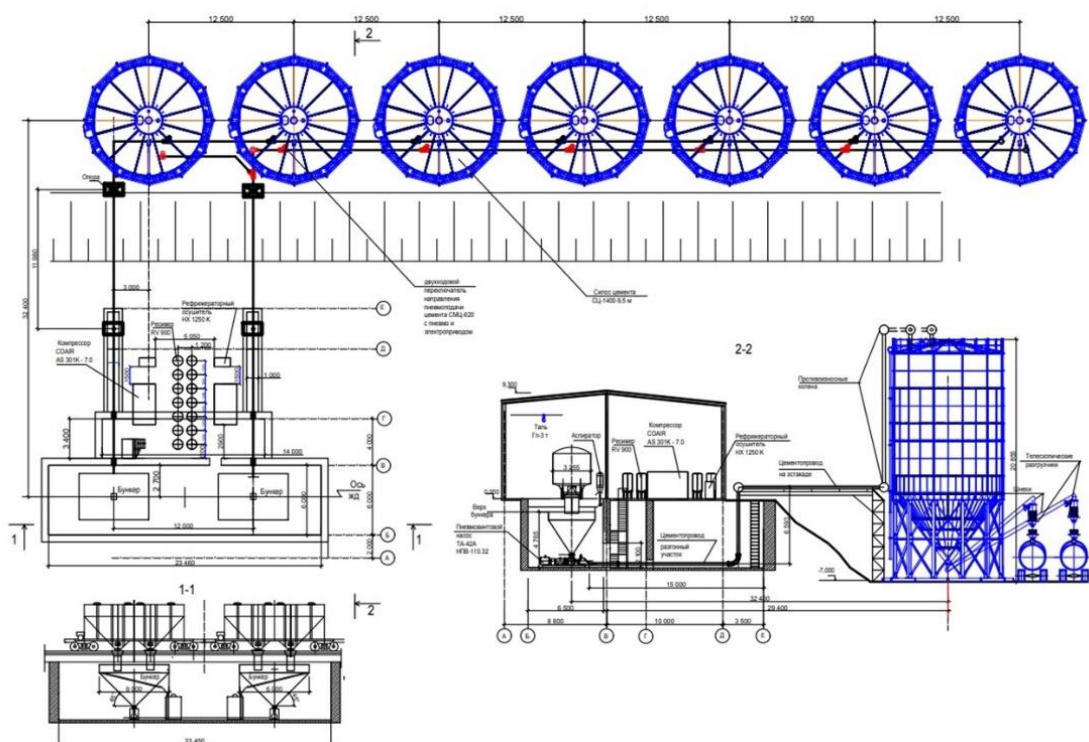


Рис. 4. Предлагаемая технологическая схема прирельсового склада

Вывод по этапу 3: для дальней транспортировки (> 70 м) – пневматика; для вертикального подъема и коротких расстояний – нория + шнеки; для высокой скорости и гибкости – комбинированная система (нория + пневмораздача).

Этап 4: Конкретизация оборудования и систем управления. Детализация оборудования по выбранной схеме:

- *Разгрузка:* аэрация: пневматические/электрические вибраторы и пневмоподушки на хоппер; затворы: пневмопривод (автоматизация), ручной – резерв; насосы для остатков: 2 пневмовинтовых (PCP), по числу конусов.

- *Транспортировка:* пневмосистемы: пневмокамерные (большие объемы, дальние дистанции) или пневмовинтовые (плавная подача); механика: желобчатые шнеки большого диаметра, нория с запасом производительности + 30 %.

- *Система управления:* базовая: локальные шкафы с реле; рекомендуемая: интеллектуальная система на PLC (автоматический цикл, контроль параметров, журнал событий, удаленный мониторинг).

Расчет и подбор вспомогательных систем: система сжатого воздуха: суммарный расход всех потребителей с коэффициентом неравномерности 1,5, итоговая производительность компрессорной – около 40 м³/мин; оборудование: винтовой компрессор с частотным регулированием, ресиверы (3600 л), осушитель (+ 3 °C), фильтры; аспирационная система: все точки пересыпа. Фильтр на силосе – с коэффициентом 1,5 к объему воздуха для предотвращения выброса пыли и поддержания разрежения.

Этап 5: Интеграция и управление: Разработка АСУ ТП: управление всеми элементами по заданному алгоритму (например, «Запуск цикла разгрузки»);



контроль уровня в бункерах приемка и силосах; мониторинг ключевых параметров: давление и расход воздуха, токовая нагрузка на двигателях, состояние фильтров (перепад давления); формирование отчетов (объем разгруженного, время простоя вагонов).

Этап 6: Оценка эффективности и принятие решения. Финальное сравнение вариантов комплектации: *ключевой показатель*: время разгрузки 1 вагона-хоппера ≤ 40 мин; *производительность*: расчет пропускной способности всех звеньев для обеспечения заданного цикла; *ТЭО*: сравнение капитальных и эксплуатационных затрат (энергопотребление, обслуживание, расходные части), расчет срока окупаемости за счет сокращения простоя вагонов.

Алгоритм принятия решения:

- метод разгрузки: по объему и экологическим требованиям. Для ≤ 40 мин – обязательны аэрация и 2 насоса; транспортировка: L велико – пневмотранспорт (базово-пневмокамерный насос); L мало, H велико – нория (с выбором типа загрузки и распределения);

- проектирование трассы: разгонный участок 5 м, минимум поворотов, радиус $\geq 1,5$ м;

- расчет системы воздуха, суммируя расход всех потребителей; с коэффициентом 1,5 к расходу на аспирацию и продувку; подбирается компрессор с ЧРП, осушитель, ресиверы (ориентир 3600 л);

- подбор аспирационной системы с фильтрами, производительность которых также учтет коэффициент 1,5.

По факту должен быть проведен проверочный расчет времени цикла для выбранной комплектации. Если время превышает 40 минут – необходимо вернуться к Шагам 1 или 2, рассмотрев более производительные варианты (например, увеличение диаметра труб, мощности насосов, добавление аэрации).

Рекомендуемая комплектация: *схема комбинированная*: герметичная разгрузка хоппера → пневмотранспорт → вертикальные нории → пневматическое распределение по силосам. Обязательны аэрация конусов (2–3 атм, 15 м³/мин) и пневмозатворы; *управление*: автоматизированная система с диспетчеризацией всего цикла; *результат*: высокая надежность, интеграция в АСУ склада.

Обсуждение и заключения

Разработан алгоритм и технологическая схема для эффективного цикла переработки сухих смесей, минимизирующие энергозатраты и пыление. Научная новизна: разработаны адаптированный к российским условиям алгоритм выбора оборудования и методов пылеудаления; инженерные решения по модернизации линий для повышения производительности, энергоэффективности и долговечности.

Результат: создание надежной, экономичной и экологичной системы управления приемкой и хранением цемента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреев, В. Р. Организация перевозки грузов железнодорожным транспортом с согласованным расписанием / В. Р. Андреев // Теоретические и концептуальные проблемы логистики и управления цепями поставок : сборник статей Всероссийской научно-практической конференции / Пензенский государственный аграрный университет. – Пенза, 2019. – С. 11–13. – ISBN 978-5-94338-971-9.

2. Адволотикин, Д. И. Моделирование складов для хранения материалов верхнего



строения железнодорожного пути/Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 10 (148) Октябрь. С. 1–8.

3. Stosic, N. Optimisation of screw compressors / N Stosic, Ian K Smith, A Kovacevic // Applied Thermal Engineering. – 2003. – № 23 (10). – P. 1177–1195. – DOI 10.1016/S1359-4311(03)00059-0 (дата обращения: 10.12.2025).

4. Рамазин, Н. И. Автоматизированная система управления технологическим процессом бункерной загрузки сыпучих материалов / Н. И. Рамазин, Д. В. Иванов // Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте : материалы VII Всероссийской научно-практической конференции. – Самара, 2025. – С. 7–10.

5. Ахмедулин, В. А., Проблема определения понятия риск / В. А. Ахмедулин, Р. Р. Ахметов, Л. Е. Алтынбаева // Теория и практика современной науки. – 2023. – №1 (91). – С. 46–51.

6. Угляница, А. В., Дуваров, В. Б. Утепление обделки подземных сооружений теплоизоляционно-конструкционным геополитиролбетоном // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 2 (150). С. 64–74. doi: 10.26730/1999-4125-2022-2-64-74.

7. Davydov, S. Y., Kosarev, N. P., Valiev, N. G. et al. Problems with the Use of Pneumatic Screw Pumps to Transport Bulk Cargo. Refract Ind Ceram 54, 100–105 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11148-013-9557-z> (дата обращения: 10.12.2025).

8. Аксенова, Н. А., Корабельников, М. И., Бастриков, С. Н., Зайцев, А. Ю. Экскурс в историю насосостроения: от ведра к сложным гидравлическим машинам / Инженер-нефтяник. 2025. № 2. С. 90–98.

9. Фадин, Ю. М., Гавриленко, А. В., Гавриленко Ю. В., Вечканова, М. В., Гавшин, А. П., Потарь, Е. Д. Пневмовинтовые насосы. Преимущества и недостатки/ В сборнике: Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. Межвузовский сборник статей. Под редакцией В. С. Богданова. Белгород, 2018. С. 371–374.

10. Шаптала, В. Г., Шаптала, В. В., Гавриленко, А. В. Численное моделирование движения цементно-воздушной смеси в пневмокамерном насосе/ Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2015. № 2. С. 159–161.

11. Жорабек, А. Н. К вопросу исследования ленточных конвейеров/ В сборнике: Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения. Материалы XII Международной научно-практической конференции. Астана, 2024. С. 302–305.

12. Гашина, А. С., Красотина, Л. В. Анализ причин аварий на объектах, использующих стальные цилиндрические силосы для хранения сухих сыпучих материалов, как инструмент усовершенствования существующей методики расчета// В сборнике: World of science. Сборник статей XII Международной научно-практической конференции. Пенза, 2025. С. 67–71.

13. Alexander Varlamov, Nelly Varlamova, Natalya Mazko Providing mechanisation of loading and unloading operations in hopper rail stores// E3S Web of Conferences 402, 01001 (2023). International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2023: (PDF) Providing mechanisation of loading and unloading operations in hopper rail stores (дата обращения: 10.12.2025).

14. Склад цемента: эффективное решение проблемы дефицита строительного сырья/ Опубликовано: 14 марта 2022 11:19 [Электронный ресурс] // Цементный терминал – устройство цементного склада.



ROZANTSEVA Nadezhda Vladimirovna, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of construction organization; DROZDOV Aleksandr Danilovich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of construction organization

ENVIRONMENTALLY FRIENDLY CONCEPT FOR TRANSPORTING AND STORING BULK MATERIALS FROM RAIL TRANSPORT TO SILOS

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering.

4 2nd Krasnoarmeyskaya St., Saint Petersburg, 190005, Russia.

Tel.: (812) 317-80-41; e-mail: nrozanceva@lan.spbgasu.ru

Key words: construction, logistics, unloading methods, pneumatic and screw feeding systems, silos.

The paper investigates methods of transporting cement from hopper wagons to silos, including traditional, pneumatic, conveyor and screw systems. Their advantages and disadvantages are analyzed. Recommendations for process optimization combining pneumatic and mechanical methods with automated technologies are proposed. The parameters for the continuous operation of the complex are calculated. The implementation of these solutions will increase productivity, improve the economic performance of enterprises and reduce the negative impact on the environment.

REFERENCES

1. Andreev V. R. Organizatsiya perevozki грузов zheleznodorozhnym transportom s soglasovannym raspisaniem [Organization of cargo transportation by rail transport with a coordinated schedule]. Teoreticheskie i kontseptualnye problemy logistiki i upravleniya tsepyami postavok [Theoretical and conceptual problems of logistics and supply chain management]: sbornik statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Penzenskiy gosudarstvenny agrarny universitet. Penza, 2019, P. 11–13.
2. Advolotkin D. I. Modelirovanie skladov dlya khraneniya materialov verkhnyego stroyeniya zheleznodorozhnogo puti [Modeling of warehouses for storing materials of the railway track superstructure]. Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal [International Research Journal]. Ekaterinburg, 2024, № 10 (148), P. 1–8.
3. Stosic N., Smith I. K., Kovacevic A. Optimisation of screw compressors. Applied Thermal Engineering. 2003, № 23 (10), P. 1177–1195. DOI 10.1016/S1359-4311(03)00059-0 (accessed: 10.12.2025).
4. Ramazin N. I., Ivanov D. V. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya tekhnologicheskim protsessom bunkernoy zagruzki syipuchikh materialov [Automated control system for the technological process of bunker loading of bulk materials]. Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie na transporte [Mechatronics, automation and control in transport]: materialy VII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Samara, 2025, P. 7–10.
5. Akhmedulin V. A., Akhmetov R. R., Altynbaeva L. E. Problema opredeleniya ponyatiya risk [The problem of defining the concept of risk]. Teoriya i praktika sovremennoy nauki [Theory and practice of modern science]. Moscow, 2023, № 1 (91), P. 46–51.
6. Uglanitsa A. V., Duvárov V. B. Uteplenie obdelki podzemnykh sooruzheniy teploizolyatsionno-konstruktivnym geopolistirolobetonom [Insulation of the lining of underground structures with thermal-insulating and structural geopolymer foam concrete]. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Kuzbass State Technical University]. Kemerovo, 2022, № 2 (150), P. 64–74. DOI 10.26730/1999-4125-2022-2-64-74.



7. Davydov S. Y., Kosarev N. P., Valiev N. G., [et al.] Problems with the Use of Pneumatic Screw Pumps to Transport Bulk Cargo. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2013, Vol. 54, P. 100–105. DOI 10.1007/s11148-013-9557-z (accessed: 10.12.2025).

8. Aksyonova N. A., Korabelnikov M. I., Batrikov S. N., Zaytsev A. Yu. Ekskurs v istoriyu nasosostroyeniya: ot vedra k slozhnym gidravlicheskim mashinam [Excursion into the history of pump engineering: from a bucket to complex hydraulic machines]. *Inzhener-neftyanik [Oil Engineer]*. Moscow, 2025, № 2, P. 90–98.

9. Fadin Yu. M., Gavrilenko A. V., Gavrilenko Yu. V., Vechkanova M. V., Gavshin A. P., Potar E. D. Pnevmoventovyye nasosy. Preimushchestva i nedostatki [Pneumatic screw pumps. Advantages and disadvantages]. *Energoberegayushchie tekhnologicheskie komplekсы i oborudovanie dlya proizvodstva stroitelnykh materialov [Energy-saving technological complexes and equipment for the production of building materials]*. Mezhdunarodnyy sbornik statey. pod red. V. S. Bogdanova. Belgorod, 2018, P. 371–374.

10. Shaptala V. G., Shaptala V. V., Gavrilenko A. V. Chislennoye modelirovaniye dvizheniya tsementno-vozdushnoy smesi v pnevmokamernom nasose [Numerical modeling of the movement of a cement-air mixture in a pneumatic chamber pump]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova [Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov]*. Belgorod, 2015, № 2, P. 159–161.

11. Zhorabek A. N. K voprosu issledovaniya lentochnykh konveyerov [On the issue of studying belt conveyors]. *Aktualnye problemy transporta i energetiki: puti ikh innovatsionnogo resheniya [Actual problems of transport and energy: ways of their innovative solution]*. Materialy XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Astana, 2024, P. 302–305.

12. Gashina A. S., Krasotina L. V. Analiz prichin avariyy na ob'yektakh, ispolzuyushchikh stalnye tsilindricheskie silosy dlya khraneniya sukhikh syipuchikh materialov, kak instrument usovershenstvovaniya sushchestvuyushchey metodiki rascheta [Analysis of the causes of accidents at facilities using steel cylindrical silos for storing dry bulk materials as a tool for improving the existing calculation method]. *World of science. Sbornik statey XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Penza, 2025, P. 67–71.

13. Varlamov A., Varlamova N., Mazko N. Providing mechanisation of loading and unloading operations in hopper rail stores. *E3S Web of Conferences*. 2023, Vol. 402, 01001. International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2023 (accessed: 10.12.2025).

14. Sklad tsementa: effektivnoye reshenie problemy defitsita stroitel'nogo syr'ya [Cement warehouse: an effective solution to the problem of shortage of building raw materials]. Opublikovano: 14 marta 2022 11:19. Tsementnyy terminal – ustroystvo tsementnogo sklada.

© Н. В. Розанцева, А. Д. Дроздов, 2026

Получено: 25.03.2026 г.



УДК 625.7/.8:691.168

Э. И. КАЮМОВА, ст. преп. кафедры автомобильных дорог, мостов и транспортных сооружений; З. Р. МУХАМЕТЗЯНОВ, д-р техн. наук, проф. кафедры автомобильных дорог, мостов и транспортных сооружений; А. Н. ПУДОВКИН, канд. техн. наук, доц. кафедры строительных конструкций

МИНЕРАЛЬНЫЙ ПОРОШОК ДЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ ИЗ ОТХОДОВ СОДОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1.

Тел.: (927) 317-90-89, эл. почта: khalilova.ru@mail.ru

Ключевые слова: минеральный порошок, асфальтобетон, отход содового производства, пористость, набухание образцов.

В статье рассмотрена возможность использования минерального отхода содового производства в качестве минерального порошка для асфальтобетонных смесей. Проанализировав результаты исследований минералогического состава минерального продукта содового производства (МПСП), авторы предложили применение МПСП в качестве исходного сырья при изготовлении минерального порошка для асфальтобетонных смесей. С этой целью были проведены лабораторные испытания МПСП на соответствие требованиям к минеральному порошку для асфальтобетонов по ГОСТ 32761-2014 в аккредитованной дорожно-строительной лаборатории. По результатам испытаний выявлено, что МПСП не соответствует требованиям ГОСТ по пористости и набуханию образцов из смеси минерального порошка с битумом. Для доведения этих показателей до нормативных значений предлагается выполнить активацию минерального порошка битумом в вакууме.

Введение

К современным автомобильным дорогам предъявляются более совершенствованные требования по их безопасности, комфортности и долговечности. Одну из основных ролей в обеспечении и улучшении этих требований играет использование модифицированных строительных материалов, в том числе и асфальтобетонов. Как и у любого строительного материала свойства асфальтобетона зависят от его состава, состояния и структуры. Одним из важных компонентов асфальтобетона является минеральный порошок, который выполняет две функции: является заполнителем пор в каркасе и переводит битумное вяжущее из объемного состояния в пленочное [1].

Требования к показателям минерального порошка регламентируют ГОСТ Р 52129-2003 «Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей» и ГОСТ 32761-2014 «Порошок минеральный. Технические требования». Проведено много научных исследований на улучшение характеристик и показателей асфальтобетонов путем подбора различных минеральных порошков, в том числе из шламовых, шлаковых и зольных отходов, отходов горнодобычи и переработки, отходов древесины, отходов металлургической промышленности.



Минеральные порошки влияют не только на показатели и характеристики асфальтобетона, но и на стоимость производства асфальтобетонной смеси. Ведь доля стоимости минерального порошка в стоимости 1 т асфальтобетонной смеси составляет примерно 10–20 % от общей стоимости в зависимости от марки и состава асфальтобетона. А стоимость производства минерального порошка для асфальтобетонов формируется в зависимости от стоимости сырья, технологии и транспортировки материала. Использование отходов и вторичного сырья для производства минерального порошка является экономически выгодным и прогрессивным способом, так как позволит снизить стоимость порошка и сохранить природные ресурсы [2–3].

Кроме того, использование отходов производства в качестве минерального порошка для асфальтобетонных смесей представляет собой эффективное решение проблемы утилизации отходов промышленности, что способствует уменьшению негативного воздействия на окружающую среду. Для хранения промышленных отходов отводятся большие площади земли, затрачиваются значительные средства, нарушается экологическое равновесие, так как загрязняется окружающая среда [4].

Материал и результаты исследования

Один из крупнейших химических комплексов Башкортостана и страны в целом – это АО «Башкирская содовая компания», производящая кальцинированную, пищевую, каустическую соду, ПВХ и соляную кислоту. При производстве соды образуются большое количество отхода в виде шламов дистиллерной жидкости. Ежегодный сброс отходов содового производства АО «БСК» оценивается от 300 до 400 тыс. тонн, а общий объем накоплений (в пересчете на сухое вещество) составляют по разным оценкам от 20 до 30 млн т [5]. После обезвоживания и обжига шламов дистиллерной жидкости, посредством фильтрационного прессования получают минеральный порошок содового производства. МПСП – твердый кускообразный негорючий материал серого цвета с массовой долей ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$) не менее 60 % и массовой долей влаги не более 35 %.

Отход содового производства является потенциальным сырьем при производстве газобетона, силикатного кирпича, строительного раствора, смешанного гидравлического вяжущего [6].

Проанализировав результаты исследований минералогического состава минерального продукта содового производства (в естественном состоянии) [7], можно предложить применение МПСП в качестве исходного сырья при изготовлении минерального порошка для асфальтобетонных смесей. С этой целью были проведены лабораторные испытания МПСП на соответствие требованиям к минеральному порошку для асфальтобетонов по ГОСТ 32761-2014. Испытания проводились в аккредитованной дорожно-строительной лаборатории МКУ «Служба строительного контроля г. Уфы». Результаты проведенных испытаний приведены в табл.



Таблица

**Результаты испытаний МПСП согласно требованиям
ГОСТ 32761-2014**

| № п/ п | Наименование показателей | Ед. изм. | Требования ГОСТ 32761-2014 | Ре- зультаты испы- таний | Соответствие |
|--|---|-------------------|--|-----------------------------------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Основные требования к минеральному порошку | | | | | |
| 1 | Зерновой состав: Мельче 2 мм Мельче 0,125 мм Мельче 0,063 мм | % | Не менее 100 Не менее 85 Не менее 70 | 100 94,0 89,1 | Соответствует Соответствует Соответствует |
| 2 | Пористость | г/см ³ | Не более 30 | 48 | Не соответствует |
| 3 | Битумоемкость | г | Не более 50 | 46,7 | Соответствует |
| Дополнительные требования к минеральному порошку | | | | | |
| 4 | Набухание образцов из смеси МП с битумом | % | Не более 3,0 | 7,5 | Не соответствует |
| 5 | Влажность | % | Не более 0,5 | 0,2 | Соответствует |
| Ненормируемые свойства минерального порошка | | | | | |
| 6 | Средняя плотность | г/см ³ | Не норм. | 1,45 | |
| 7 | Истинная плотность | г/см ³ | Не норм. | 2,79 | |
| 8 | Содержание битума | % | Не норм. | 30 | |

Как видно из результатов испытаний, МПСП не соответствует требованиям ГОСТ 32761-2014 по пористости и набуханию образцов из смеси минерального порошка с битумом.

Пористость минерального порошка и набухание образцов из смеси минерального порошка с битумом зависят от объема пор внутри частиц порошка. Этот показатель характеризует склонность к водопоглощению и стабильность мастики. Высокие значения пористости и набухания образцов минерального порошка с битумом снижают водостойкость, морозостойкость и прочность асфальтобетонной смеси. Это связано с тем, что, чем больше пор, тем больше воды может впитать материал. Вода смачивает гидрофильную поверхность минеральных зерен и способна частично или полностью вытеснить сорбированный битум. Это разрушает структурные связи в асфальтобетоне и облегчает разрушение покрытия. Также пористый минеральный порошок может занять часть пористости асфальтобетонной смеси, увеличивая ее плотность.

Существуют различные способы регулирования пористости и набухания образцов минерального порошка с битумом:

- гидрофобизация минерального порошка;
- обеспечение однородной поверхности (термическая обработка);
- нанесение полимерных покрытий;



- использование битумных модификаторов;
- увеличение содержания битума;
- механоактивация (оптимизация гранулометрического состава);
- химическая активация – активирующую смесь вводят в мельницу одновременно с материалом, подлежащим измельчению [8–11].

Проанализировав многие исследования по этой теме, предлагается выполнить обработку минерального порошка битумом в вакууме. При этом битум равномерно будет покрывать частицы минерального порошка, создавая защитный слой, и заполнит поры. Вакуум будет «всасывать» испаряющиеся летучие вещества и влагу. Это будет способствовать уменьшению пористости, увеличению гидрофобности и устойчивости к набуханию.

Выводы

Минеральный порошок содового производства возможно использовать в качестве минерального порошка для асфальтобетонных смесей. Но необходимо довести до требуемых нормативных значений показателей по пористости и набуханию образцов с битумом. Для этого необходимо выполнить обработку минерального порошка содового производства битумом в вакууме для того, чтобы показатели пористости и набухание образцов минерального порошка с битумом соответствовали требованиям ГОСТ 32761-2014.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование влияния минеральных порошков различного химико-минералогического состава на свойства асфальтобетонных смесей / М. А. Ликомаскина, М. С. Р. Алнаиф, А. И. Сальникова, А. А. Миронов // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 2. – С. 53–63.
2. Ханнанова, Г. Т. Минеральный порошок на основе пиритных огарков в составах асфальтобетонных смесей : специальность 05.23.05 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ханнанова Гульнур Талгатовна ; Уфимский государственный нефтяной технический университет. – Уфа, 2009. – 184 с.
3. Разинкова, О. А. Мелкозернистые цементные и асфальтовые бетоны с использованием порошковых модификаторов и наполнителей из отходов кеков гидрометаллургического производства : специальность 05.23.05 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Разинкова Ольга Александровна ; [Место защиты: Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет]. – Нальчик, 2012. – 148 с. : ил.
4. Композиционные материалы для дорожного строительства на основе отходов химической и металлургической промышленности / В. В. Бабков, И. В. Недосеко, А. О. Глазачев [и др.] // Строительные материалы. – 2023. – № 1-2. – С. 88–94. – DOI 10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-88-94.
5. Разработка добавок и новых материалов для строительства на основе вторичных ресурсов Республики Башкортостан : отчет о научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе / Д. А. Синицин, И. В. Недосеко, А. О. Глазачев [и др.] ; Уфимский государственный нефтяной технический университет. – Уфа, 2022. – 160 с.
6. Строительные материалы на основе промышленных отходов Республики Башкортостан / Р. Ф. Вагапов, Д. А. Синицин, А. А. Оратовская, Г. В. Тэненбаум // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 4 (22). – С. 279–284.
7. Мамулат, С. Л. Анализ состава, свойств и перспективы применения минерального продукта содового производства АО «Башкирская содовая компания» для изготовления энергоэффективных вяжущих / С. Л. Мамулат, В. В. Бабков, Э. М. Давыдов



[и др.] // Строительные материалы. – 2022. – № 3. – С. 61–73. – DOI 10.31659/0585-430X-2022-800-3-61-73.

8. Ядыкина, В. В. Изменение свойств асфальтобетона при использовании гидрофобизированного минерального порошка / В. В. Ядыкина, Е. В. Кузнецова, М. С. Лебедев // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2020. – № 4. – С. 17–23. – DOI 10.34031/2071-7318-2020-5-4-17-23.

9. Фундаментальные основы механической активации, механосинтеза и механохимических технологий / В. В. Болдырев [и др.]. – Новосибирск : Издательство Сибирского отделения Российской акад. Наук, 2009 – 343 с. – ISBN 978-5-7692-0669-6.

10. Траутвайн, А. И. Изучение физико-механических свойств асфальтобетонных образцов на активированных минеральных порошках различных составов / А. И. Траутвайн, В. В. Ядыкина, Е. С. Муленко // Строительные материалы и изделия. – 2018. – Том 1, № 4. – С. 44–50.

11. Мухаметзянов, З. Р. Разработка метода капитального ремонта магистральных трубопроводов с применением композитных материалов / З. Р. Мухаметзянов, Н. Э. Урманшина, Р. А. Фаюршин // Вестник НИЦ Строительство. – 2022. – № 1 (32). – С. 141–153. – DOI 10.37538/2224-9494-2022-1(32)-141-153.

KAYUMOVA Ilmira Ilshatovna, senior teacher of the chair of highways, bridges and transport structures; MUKHAMETZYZANOV Zinur Rishatovich, doctor of technical science, professor of the chair of highways, bridges and transport structures; PUDOVKIN Aleksandr Nikolaevich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of building structures

MINERAL POWDER FOR ASPHALT CONCRETES FROM SODA PRODUCTION WASTE

Ufa State Petroleum Technological University.

Kosmonavtov St., 1, Ufa, 450064, Russia.

Tel.: (927) 317-90-89; e-mail: khalilova.ru@mail.ru

Key words: mineral powder, asphalt concrete, soda production waste, porosity, sample swelling.

The article discusses the feasibility of using mineral waste from soda production as a mineral powder for asphalt concrete mixtures. After analyzing the results of studies on the mineralogical composition of the mineral product from soda production (MPSP), the authors proposed using MPSP as a raw material for the production of mineral powder for asphalt concrete mixtures. To this end, MPSP was tested in an accredited road construction laboratory to ensure compliance with the requirements for mineral powder for asphalt concrete according to GOST 32761-2014. The test results revealed that the MPSP fails to meet the GOST standards regarding the porosity and swelling of specimens made from a mineral powder and bitumen mixture. To bring these parameters to the required values, the authors propose activating the mineral powder with bitumen in a vacuum.

REFERENCES

1. Likomaskina M. A., Alnaif M. S. R., Salnikova A. I., Mironov A. A. Issledovanie vliyaniya mineralnykh poroshkov razlichnogo khimiko-mineralogicheskogo sostava na svoystva asfaltobetonnykh smesey [Investigation of the influence of mineral powders of various chemical and mineralogical composition on the properties of asphalt concrete mixtures]. Regionalnaya arkhitektura i stroitelstvo [Regional Architecture and Construction]. Volgograd, 2017, № 2, P. 53–63.



2. Khannanova G. T. Mineralny poroshok na osnove piritnykh ogarkov v sostavakh asfaltobetonnykh ogarkov [Mineral powder based on pyrite cinders in the compositions of asphalt concrete cinders] : spetsialnost 05.23.05 : diss. ... kand. tekhn. nauk ; Ufimskiy gos. neftyanoy tekhnich. un-t. Ufa, 2009, 184 p.

3. Razinkova O. A. Melkozernistye tsementnye i asfaltovye betony s ispolzovaniem poroshkovykh modifikatorov i napolniteley iz otvalnykh kekov gidrometallurgicheskogo proizvodstva [Fine-grained cement and asphalt concretes using powder modifiers and fillers from dump cakes of hydrometallurgical production] : spetsialnost 05.23.05 : diss. ... kand. tekhn. nauk ; Volgogradskiy gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nalchik, 2012, 148 p.

4. Babkov V. V., Nedoseko I. V., Glazachev A. O. [et al.]. Kompozitsionnye materialy dlya dorozhnogo stroitelstva na osnove otkhodov khimicheskoy i metallurgicheskoy promyshlennosti [Composite materials for road construction based on waste of the chemical and metallurgical industries]. Stroitelnye materialy [Building Materials]. Moscow, 2023, № 1-2, P. 88–94. DOI 10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-88-94.

5. Sinitsyn D. A., Nedoseko I. V., Glazachev A. O. [et al.]. Razrabotka dobavok i novykh materialov dlya stroitelstva na osnove vtorichnykh resursov Respubliki Bashkortostan [Development of additives and new materials for construction based on secondary resources of the Republic of Bashkortostan]. Ufimskiy gos. neftyanoy tekhnich. un-t. Ufa, 2022, 160 p.

6. Vagapov R. F., Sinitsyn D. A., Oratovskaya A. A., Tenenbaum G. V. Stroitelnye materialy na osnove promyshlennykh otkhodov Respubliki Bashkortostan [Building materials based on industrial waste of the Republic of Bashkortostan]. Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Proceedings of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering]. Kazan, 2012, № 4 (22), P. 279–284.

7. Mamulat S. L., Babkov V. V., Davydov E. M. [et al.]. Analiz sostava, svoystv i perspektivy primeneniya mineralnogo produkta sodovogo proizvodstva AO «Bashkirskaya sodovaya kompaniya» dlya izgotovleniya energoeffektivnykh vyazhushchikh [Analysis of the composition, properties and prospects for the use of a mineral product of soda production of JSC "Bashkir Soda Company" for the production of energy-efficient binders]. Stroitelnye materialy [Building Materials]. Moscow, 2022, № 3, P. 61–73. DOI 10.31659/0585-430X-2022-800-3-61-73.

8. Yadykina V. V., Kuznetsova E. V., Lebedev M. S. Izmenenie svoystv asfaltobetona pri ispolzovanii gidrofobizirovannogo mineralnogo poroshka [Change in the properties of asphalt concrete when using a hydrophobized mineral powder]. Vestnik BG TU im. V. G. Shukhova [Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov]. Belgorod, 2020, № 4, P. 17–23. DOI 10.34031/2071-7318-2020-5-4-17-23.

9. Boldyrev V. V. [et al.]. Fundamentalnye osnovy mekhanicheskoy aktivatsii, mekhanosinteza i mekhanokhimicheskikh tekhnologiy [Fundamental foundations of mechanical activation, mechanosynthesis and mechanochemical technologies]. Novosibirsk, Izdatelstvo Sibirskogo otdeleniya Rossiyskoy akad. Nauk, 2009, 343 p. ISBN 978-5-7692-0669-6.

10. Trautvain A. I., Yadykina V. V., Mulyenko E. S. Izuchenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv asfaltobetonnykh obraztsov na aktivirovannykh mineralnykh poroshkakh razlichnykh sostavov [Study of the physico-mechanical properties of asphalt concrete samples on activated mineral powders of various compositions]. Stroitelnye materialy i izdeliya [Building Materials and Products]. Moscow, 2018, Vol. 1, № 4, P. 44–50.

11. Mukhametzyanov Z. R., Urmanchina N. E., Fayurshin R. A. Razrabotka metoda kapitalnogo remonta magistralnykh truboprovodov s primeneniem kompozitnykh materialov [Development of a method for major repair of main pipelines using composite materials]. Vestnik NITs Stroitelstvo [Bulletin of the Research Center of Construction]. Moscow, 2022, № 1 (32), P. 141–153. DOI 10.37538/2224-9494-2022-1(32)-141-153.

© Э. И. Каюмова, З. Р. Мухаметзянов, А. Н. Пудовкин, 2026

Получено: 05.03.2026 г.

УДК 711.424(470.341-25)

Л. Н. ОРЛОВА, д-р техн. наук, проф. кафедры архитектурного проектирования; **С. В. НОРЕНКОВ**, д-р филос. наук, проф. кафедры архитектурного проектирования; **Е. С. КРАШЕНИННИКОВА**, канд. филос. наук, доц. кафедры туризма и сервиса

АНСАМБЛЕВОСТЬ И КОМПЛЕКСНОЕ РАЗВИТИЕ ТЕРРИТОРИЙ В АРХИТЕКТУРНО-ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ УРБАНИСТИКЕ (НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕГО НОВГОРОДА)

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-00-83; эл. почта: orludm.orlova@yandex.ru, snorenkov@yandex.ru, krash_es@mail.ru

Ключевые слова: ансамблевость, комплексное развитие территорий, архитектурно-градостроительная урбанистика, Нижний Новгород.

В статье приводится системный анализ реализованных проектов комплексного освоения территорий с высочайшим качеством ансамблевости, присущим лучшим архитектурно-градостроительным и технологически-урбанистическим достижениям города Нижнего Новгорода. Архитектурно-градостроительная урбанистика в инновационных технико-технологических достижениях и обновляемой социальной архитектонике культурно-экономического развития российского общества предполагает возвышение горизонтов общественных перспектив становления отечественного зодчества.

Введение

Многообразные методологические подходы в переходах от комплексного развития территорий (КРТ) к ансамблестроению активно проявляются в современной архитектурно-градостроительной урбанистике. На ряде примеров комплексного развития территорий в Нижнем Новгороде показано, как ансамблевость проявляется стратегическим ориентиром в отечественном зодчестве.

Ансамблевость и комплексное развитие территорий

История Нижегородского зодчества демонстрирует яркие примеры ансамблевых решений исторических территорий и геолого-экологически сложных пространств, отмеченных как шедевры не только в нашей стране, но и за ее рубежами: Нижегородский Кремль (рис. 1, 2 цв. вклейки), Стрелка, Нижегородская Ярмарка (рис. 3, 4 цв. вклейки).

Отечественная архитектурно-градостроительная и технологически-урбанистическая практики претерпели значительные преобразования в девяностые годы XX столетия. На рубеже тысячелетий и, особенно за последнее десятилетие, зодчество вступило на новый этап – комплексного развития территорий (КРТ) [1–5]. Данный подход хорошо просматривается в поступательном ансамблевом освоении исторических территорий Нижнего Новгорода (рис. 1–6 цв. вклейки). Высочайшее качество ансамблевости

отечественного зодчества проявилось в пятисотлетней давности живописного расположения Кремля и богатейшей Международной ярмарки в Нижнем Новгороде на слиянии двух великих рек – Оки и Волги.

Выявлены характерные закономерности промежуточных этапов на пути к системному видению и архитектурно-градостроительному проектированию с позиций разных видов современной урбанистики. Урбанистика сопрягает архитектуру и градостроительство на более высоком уровне интегрального синтеза социально-антропологического и культурно-экономического ракурсов цивилизационной актуализации синархно-тектонической целостности современного мегаполиса, такого как Нижний Новгород. При этом процесс поступательного становления регионального зодчества обеспечивается за счет развития творческих (креативных) индустрий, объединяющих архитектуру, урбанистику и дизайн [6, 7].

Анализ реализованных проектов комплексного освоения территорий в Российской Федерации [8, 9] выявил настоятельную необходимость оценки проектных решений по критерию ансамблевости, что особенно важно проводить на заключительной фазе проектной деятельности, предваряющей разработку рабочей проектной документации и экспертизу проектов.

Ансамблевость, с точки зрения становления комплексного развития территорий, является более высоким профессиональным уровнем формирования пространств, единовременно воспринимаемых человеком в своем естественном архитектурно-градостроительном окружении.

Главная задача – объединить город в один визуальный код, сгладить разрыв между центром и окраинами, создать полноценную городскую среду.

Прослеживается четкая стратегия ориентированности на человека: город как среда для жизни, а не просто территория под застройку. Благоприятная городская среда должна быть безопасной, благоустроенной, давать возможности для развития, создавать социальные связи, быть разнообразной и делать человека счастливым.

«Архитектура города отличается своеобразным историческим развитием: с одной стороны, она развивалась в общем русле русского зодчества, соединяя в себе черты столичной российской и европейской архитектуры, с другой – подвергалась влиянию региональных традиций, отличавшихся художественным богатством и самобытностью, обусловленных разнообразием кустарных промыслов Нижегородского края» [10]. Взаимосвязанные ансамбли площадей, набережных и улиц с сетевой вокругкремлевской структурой в значительной степени усиливают качество ожерельной ансамблевости исторической части Нижнего Новгорода (рис. 1 цв. вклейки). Знаковым объектом стала Набережная Федоровского – благоустроенный откос Волги, красивое место для неспешного променада: петляющие дорожки, заманчивые террасы и стройные лестницы, ведущие с Нижневолжской набережной на Рождественскую улицу, открывают панорамы, похожие на настоящие картины, особенно на закатах (рис. 6 цв. вклейки) [11].

Архитектура Нижнего Новгорода 1990-х годов стала уникальным феноменом, «столицей архитектурного зодчества», по мнению критика Г. И. Ревзина (1998 г.). Возникновение феномена связано с нижегородской архитектурной школой 90-х годов и ее основателями – архитекторами Александром Харитоновым и Евгением Пестовым, которые смогли собрать



нижегородских архитекторов в своеобразное творческое содружество, объединенное идеями преобразования города, запрета на законодательном уровне строительства по типовым проектам в исторической части Нижнего Новгорода, возвращения в него настоящей архитектуры. В рамках этих идей выработался уникальный средовой подход к строительству: формирование комплексной, «дворовой» архитектуры, ориентированной на человека.

Действующая редакция генплана Нижнего Новгорода до 2030 г., разработанная ГУП НИиПИ генплана г. Москвы в 2011 г., отнесла к индивидуальным особенностям города: природную ситуацию, своеобразие ландшафта, особенности исторического развития, планировочной структуры и пространственной организации застройки.

Мегаполис продолжает разрастаться как вширь и ввысь, так и по числу жителей. При этом за последние годы у города сложился стиль, корнями уходящий в прошлое, но адаптированный под XXI век. Новые здания в городе встроены в среду с множеством исторических слоев: здесь сложность городской ткани отражает сложность истории. При этом, когда визуальная цельность пространства достигнута, появляется новый тренд: здания, которые сознательно выбиваются из общего ритма. Они не подстраиваются под окружение, а, наоборот, подчеркивают свои отличия.

Нижний Новгород в последние 10–15 лет движется градостроительно к повышению этажности и к плотной агломерации: города-спутники с их окружением сращиваются с мегаполисом: так, муниципальный городской округ г. Кстово в 2025 г. вошел в состав Нижнего Новгорода.

Архитектурно город продвигается по линии неомодернизма, в котором взаимосвязаны элементы деконструктивизма, неоконструктивизма и хай-тека [12]: простая геометрия, сталь, стекло, бетон, отсутствие декора. Для новейшего нижегородского модернизма стали характерны: отказ от однообразия; уход от историзма; внимание к трактовке деталей и пластике фасадов; создание сложной композиции; контраст цвета и фактур; геометризация объемов; использование новых строительных материалов, конструкций и технологий.

В Нижнем Новгороде все больше внимания уделяется авторской архитектуре и все меньше – типовым проектам образовательных объектов и жилья. Это касается не только частных, но и государственных объектов. Яркий пример – новые корпуса IT-квартала в Започаинье (рис. 7 цв. вклейки) и «школы 800» в Новинках [11].

IT-квартал площадью 300 Га создается в центре Нижнего Новгорода, в Започаинье. Концепция, рассчитанная на реализацию до 2030 г., предполагает создание мультифункциональной среды, которая позволит IT-специалистам и студентам профильных специальностей жить, учиться, работать и заниматься наукой в пределах одного общего пространства. Сегодня идет строительство IT-кампуса «Неймарк» общей площадью 226,4 тыс. м², который рассчитан почти на 8 тыс. студентов и включает восемь зон: исследовательскую, образовательную, жилую, спортивную, культурно-досуговую, предпринимательскую, коммерческую и социальную. На ул. Дальней размещается главный учебный корпус межвузовского кампуса, а рядом с ним, на ул. Большие Овраги, появится гостиница из 18 корпусов. Технопарк займет территорию по соседству – в границах улиц Ильинская, Маслякова, Малая Ямская и Большие Овраги. Согласно концепции, здесь разместятся офисы, лаборатории,

**К СТАТЬЕ Л. Н. ОРЛОВОЙ, С. В. НОРЕНКОВА, Е. С. КРАШЕНИННИКОВОЙ
«АНСАМБЛЕВОСТЬ И КОМПЛЕКСНОЕ РАЗВИТИЕ ТЕРРИТОРИЙ
В АРХИТЕКТУРНО-ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ УРБАНИСТИКЕ
(НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕГО НОВГОРОДА)»**



Рис. 1. Современная фотопанорама Нижнего Новгорода на слиянии рек Оки и Волги (фотоснимок Александра Ивасенко)



Рис. 2. Современная фотопанорама ансамбля Нижегородского Кремля



Рис. 3. Современная фотопанорама ансамбля Стрелки в Нижнем Новгороде на слиянии рек Оки и Волги



Рис. 4. Современная фотопанорама ансамбля Нижегородской ярмарки



Рис. 5. Ансамблево-комплексная перспектива площади Революции в Нижнем Новгороде (напротив Московского вокзала) с пешеходным раскрытием в сторону набережной р. Оки с освещением в вечернее время (слева направо): «Макдональдс»: арх. А. Е. Харитонов, Е. Н. Пестов, Б. Тарасов (2000 г.), торговый центр «Республика»: арх. С. В. Норенков, А. В. Крашенинников (2005 г.), «Универмаг»: арх. В. Н. Рымаренко (1950 г.)

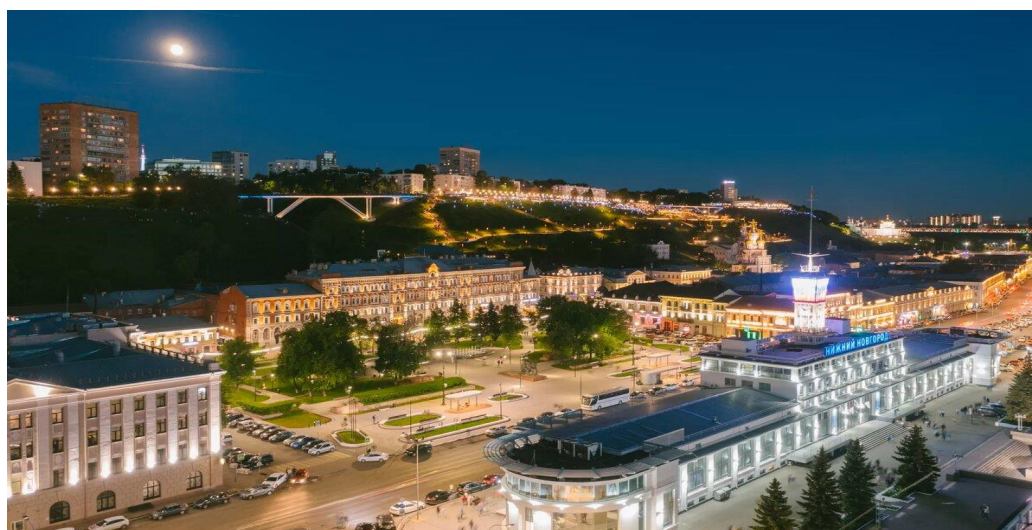


Рис. 6. Современная фотопанорама ансамбля площади Маркина с видом на набережную Федоровского



Рис. 7. Архитектурный макет нижегородского технопарка и IT-кампуса «Неймарк». Источник: АБ «Студия 44»



Рис. 8. Архитектурный макет ансамбля застройки Правительственной площади на Сенной в Нижегородском районе. Источник: mingrad.nobl.ru

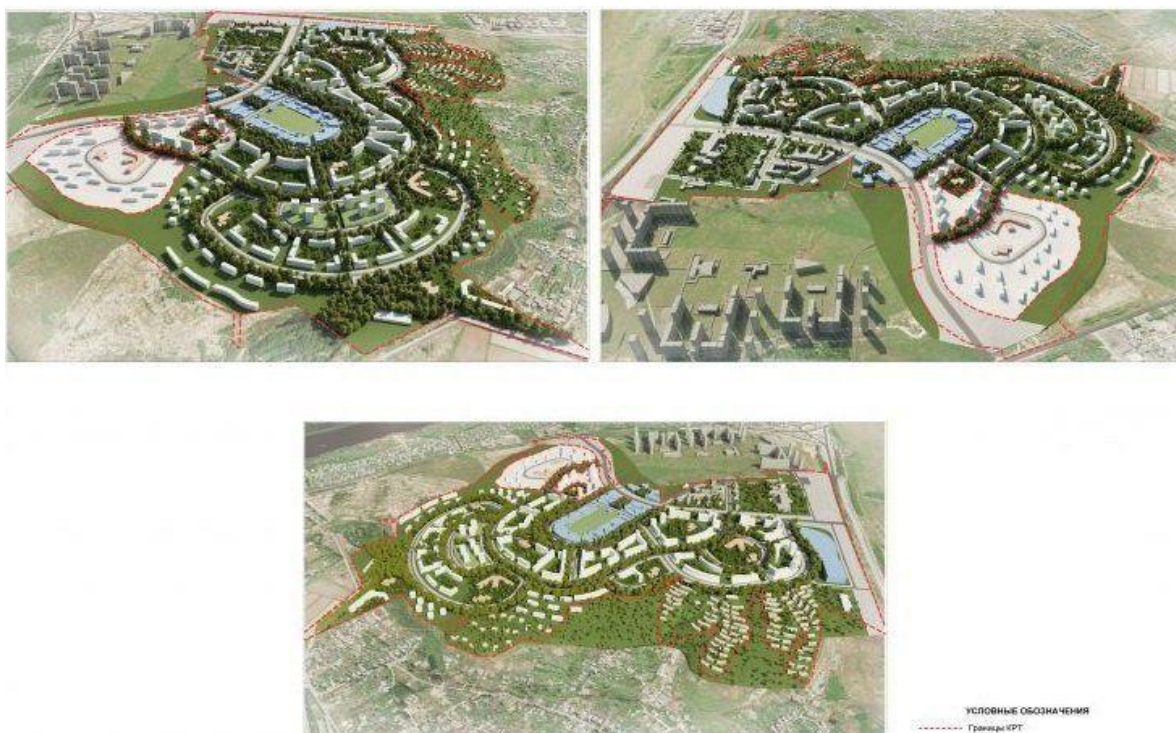


Рис. 9. Архитектурный макет ансамбля застройки территории в Новинках (с различных ракурсов). Источник: mingrad.nobl.ru



Рис. 10. Архитектурный макет ансамбля застройки территории в Ольгино (с различных ракурсов). Источник: mingrad.nobl.ru

производства, коворкинг, конгресс-холл, а под ними найдется место для подземного паркинга с электрозаправками. Фишками проекта станут озелененные крыши, большие террасы, амфитеатр и гастрономическая улица.

Первые площадки под КРТ в Нижнем Новгороде нашли инвесторов еще 1,5 года назад, а в 2025 году намечены уже почти 50 локаций. Сегодня практика демонстрирует системный подход к застройке как застроенных (рис. 8 цв. вклейки), так и незастроенных (рис. 9, 10 цв. вклейки) территорий с использованием приема ансамблевости [11].

Правительственный квартал на Сенной (площадь 11,15 Га) [11] – деловой кластер в районе пересечения улиц Горького и Большой Печерской на 307,54 тыс. м² площадей, где под жилье отводится 220,4 тыс. м². Сюда переведут офисы чиновников из Нижегородского Кремля, а исторической территории крепости полностью придадут музейно-выставочную функцию. Деловой кластер соединят с новой станцией по принципу «сухие ноги»: людям не придется выходить на улицу, чтобы попасть в подземку. Правительственный квартал станет частью масштабной реновации территории возле площади Сенной: в ближайшем будущем историческая территория обретет абсолютно новый облик и после открытия станции метро станет крупным транспортным узлом.

Площадка, отведенная под КРТ в Новинках [11], площадью 89,6 Га, (рис. 9 цв. вклейки), находится неподалеку от ЖК «Стрижи», граничит с ЖК «Новинки *Smart City*» и трассой Ряжск – Касимов – Муром – Нижний Новгород. В рамках первой очереди возведут 17 корпусов переменной этажности (от 9 до 13), первые этажи которых объединит торговая галерея с магазинами, кафе и заведениями сферы услуг. На территории ЖК предусматривается разместить плоскостную наземную парковку. Социальная инфраструктура нового района включает школу на 1200 учащихся и четыре детских сада (три на 200 и один на 280 мест). При разработке концепции благоустройства территории в Новинках ландшафтные архитекторы сохраняют и адаптируют под рекреации естественный холмистый рельеф территории, являющийся визитной карточкой живописных мест в прибрежных зонах Оки.

Новый жилой район площадью 265–284 Га с населением 45,5 тысяч человек вырастет на незастроенных землях между дорогами Нижний Новгород – Арзамас – Ольгино – Большая Ельня (рис. 10 цв. вклейки) [11]. Согласно мастер-плану, застройку разделят на 14 кварталов, которые возведут в рамках девяти очередей. Основу застройки нового района составят 9–10 этажные дома, а в центре, на территории оврага, будет разбит парк.

Еще десять лет назад сложно было представить вектор развития территорий в Нижнем Новгороде. Прорывным решением стал механизм комплексного развития территорий, ориентированный на создание полноценных кварталов со всей необходимой инфраструктурой – многофункциональных ансамблей, где гармонично сочетаются жилая, офисная и общественная зоны.

Заключение

1. Урбанистика сопрягает архитектуру и градостроительство на более высоком уровне интегрального синтеза социально-антропологического и культурно-экономического ракурсов цивилизационной актуализации синархио-тектонической целостности современного мегаполиса.

2. Закономерное проявление ансамблевости, с точки зрения становления комплексного развития территорий, является более высоким профессиональным



уровнем формирования пространств, единовременно воспринимаемых человеком в своем естественном архитектурно-градостроительном окружении.

3. Проведенный анализ направлений деятельности по реализации комплексного развития территорий в Нижнем Новгороде, в том числе реализованных проектов, указывает на необходимость углубленного использования критического механизма ансамблевости в проектной практике и развитие его в направлении более системного подхода с использованием синтеза искусств.

4. Стратегическим направлением становится создание многофункциональных ансамблей, где жилая, офисная и общественная зоны гармонично сочетаются, что требует нового подхода к организации пространства и обеспечению комфортного взаимодействия всех элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Российская Федерация. Законы. Градостроительный кодекс Российской Федерации : ГК РФ : Федеральный закон Российской Федерации от 29 декабря 2004 года № 190-ФЗ : [принят Государственной Думой 22 декабря 2004 года : одобрен Советом Федерации 24 декабря 2004 года] : [редакция от 23.03.2026]. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный.

2. Российская Федерация. Правительство. Об экспериментальных инвестиционных проектах комплексного освоения территорий в целях жилищного строительства : постановление Правительства Российской Федерации от 5 мая 2007 г. N 265. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный.

3. Российская Федерация. Законы. О внесении изменений в Градостроительный кодекс Российской Федерации, отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования регулирования подготовки, согласования и утверждения документации по планировке территории и обеспечения комплексного и устойчивого развития территорий и признании утратившими силу отдельных положений законодательных актов Российской Федерации от 03.07.2016 г. № 373-ФЗ : [принят Государственной Думой 24 июня 2016 года : одобрен Советом Федерации 29 июня 2016 года] : [редакция от 02.08.2019]. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный.

4. Российская Федерация. Законы. О внесении изменений в Градостроительный кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации в целях обеспечения комплексного развития территорий от 30 декабря 2020 года № 494-ФЗ : [принят Государственной Думой 23 декабря 2020 года : одобрен Советом Федерации 25 декабря 2020 года]. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный.

5. Стандарт комплексного развития территорий : в 6 книгах : 4 каталога / Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации ; ДОМ. РФ ; КБ «Стрелка». – URL: <https://дом.рф/urban/standards/printsipy-kompleksnogo-razvitiya-territoriy/?ysclid=mpf7na8fza128456926>. – Текст : электронный.

6. Норенков, С. В. Архитектурно-градостроительный дизайн: профессиональная проектно-исследовательская терминология : учебное пособие. Часть 1 / С. В. Норенков, Е. С. Крашенинникова, В. В. Шилин ; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2025. – 281 с. – ISBN 978-5-528-00612-3. – ISBN 978-5-528-00616-1.

7. Крашенинникова, Е. С. Архитектурно-градостроительный дизайн : синфилософия культурэкономики зодчества: (профессиональная проектно-исследовательская терминология). Часть 2 / Е. С. Крашенинникова, С. В. Норенков, В. В. Шилин ; Нижегородский государственный архитектурно-строительный



университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2025. – 293 с. – ISBN 978-5-528-00612-3. – ISBN 978-5-528-00620-8.

8. Орлова, Л. Н. Комплексное развитие территорий: отечественная практика проектной реализации в рамках государственных программ / Л. Н. Орлова, С. В. Норенков, В. А. Денисова // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород. – 2024. – № 1 (69). – С. 244–252.

9. Орлова, Л. Н. Общественные пространства в концепциях комплексного развития территорий / Л. Н. Орлова, В. А. Денисова // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород. – 2025. – № 1 (73). – С. 227–233.

10. Лисицына, А. В. Историко-архитектурная среда «пограничных» городов Нижегородского Поволжья / А. В. Лисицына // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – Казань, 2016. – № 2. – С. 39–48. – ISSN 2073–154X.

11. Застройка по КРТ в Нижнем Новгороде: первые итоги и планы на 2025 год. – URL: <https://www.gipernn.ru/zhurnal/razvitie-regiona/stati/zastroyka-po-krt-v-nizhnem-novgorode-pervye-itogi-i-plany-na-2025-god>.

12. Орельская, О. В. Стилистический вектор новейшей региональной архитектуры (на примере Нижнего Новгорода) / О. В. Орельская // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2018 году : сборник научных трудов. – Москва, 2019. – С. 121–138.

ORLOVA Lyudmila Nikolaevna, doctor of technical science, professor of the chair of architectural design; NORENKOV Sergey Vladimirovich doctor of philosophic sciences, professor of the chair of architectural design; KRASHENINNIKOVA Evgeniya Sergeevna, candidate of philosophic sciences, associate professor of the chair of tourism and service

ENSEMBLE APPROACH AND COMPREHENSIVE TERRITORIAL DEVELOPMENT IN ARCHITECTURAL AND URBAN PLANNING (A CASE STUDY OF NIZHNY NOVGOROD)

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia,

Tel.: (831) 430-17-83; e-mail: orludm.orlova@yandex.ru, snorenkov@yandex.ru, krash_es@mail.ru

Key words: ensemble approach, comprehensive territorial development, architectural and urban planning, Nizhny Novgorod.

The article provides a systematic analysis of the implemented comprehensive territorial development projects characterized by exceptional ensemble coherence, reflecting the finest architectural, urban planning, and technological-urban achievements of Nizhny Novgorod. Driven by innovative technological advancements and the evolving social architectonics of Russia's cultural and economic development, architectural and urban planning aims to elevate the societal vision for the evolution of national architecture.

REFERENCES

1. Rossiyskaya Federatsiya. Zakony. Gradostroitelny kodeks Rossiyskoy Federatsii : GK RF : Federalny zakon Rossiyskoy Federatsii ot 29 dekablya 2004 goda № 190-FZ [Urban Planning Code of the Russian Federation : UPC RF : Federal Law of the Russian Federation dated December 29, 2004 No. 190-FZ]: prinyat Gosudarstvennoy Dumoy 22 dekablya 2004 goda : odobren Sovetom Federatsii 24 dekablya 2004 goda : redaktsiya ot 23.03.2026. URL: <http://www.consultant.ru>.
2. Rossiyskaya Federatsiya. Pravitelstvo. Ob eksperimentalnykh investitsionnykh proektakh kompleksnogo osvoeniya territoriy v tselyakh zhilishchnogo stroitelstva : postanovlenie Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 5 maya 2007 g. N 265 [On Experimental Investment Projects for Comprehensive Territorial Development for the Purpose of Housing Construction : Resolution of the Government of the Russian Federation dated May 5, 2007 No. 265]. URL: <http://www.consultant.ru>.
3. Rossiyskaya Federatsiya. Zakony. O vnesenii izmeneniy v Gradostroitelny kodeks Rossiyskoy Federatsii, otdelnye zakonodatelnye akty Rossiyskoy Federatsii v chasti sovershenstvovaniya regulirovaniya podgotovki, soglasovaniya i utverzhdeniya dokumentatsii po planirovke territorii i obespecheniya kompleksnogo i ustoychivogo razvitiya territoriy i priznanii utrativshimi silu otdelnykh polozheniy zakonodatelnykh aktov Rossiyskoy Federatsii ot 03.07.2016 g. № 373-FZ [On Amending the Urban Planning Code of the Russian Federation and Certain Legislative Acts of the Russian Federation regarding the Improvement of the Regulation of the Preparation, Approval, and Adoption of Territorial Planning Documentation and the Ensuring of Comprehensive and Sustainable Development of Territories, and on Recognizing Certain Provisions of Legislative Acts of the Russian Federation as Expired dated July 3, 2016 No. 373-FZ] : redaktsiya ot 02.08.2019. URL: <http://www.consultant.ru>.
4. Rossiyskaya Federatsiya. Zakony. O vnesenii izmeneniy v Gradostroitelny kodeks Rossiyskoy Federatsii i otdelnye zakonodatelnye akty Rossiyskoy Federatsii v tselyakh obespecheniya kompleksnogo razvitiya territoriy ot 30 dekablya 2020 goda № 494-FZ [On Amending the Urban Planning Code of the Russian Federation and Certain Legislative Acts of the Russian Federation for the Purpose of Ensuring Comprehensive Territorial Development dated December 30, 2020 No. 494-FZ]: prinyat Gosudarstvennoy Dumoy 23 dekablya 2020 goda : odobren Sovetom Federatsii 25 dekablya 2020 goda. URL: <http://www.consultant.ru>.
5. Standart kompleksnogo razvitiya territoriy [Standard of Comprehensive Territorial Development]: v 6 knigakh : 4 kataloga. Ministerstvo stroitelstva i zhilishchno-kommunalnogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ; DOM.RF ; KB Strelka. URL: <https://dom.rf/urban/standards/printsipy-kompleksnogo-razvitiya-territoriy/?ysclid=mpf7na8fza128456926>.
6. Norenkov S. V., Krashennnikova E. S., Shilin V. V. Arkhitekturno-gradostroitelny dizayn: professionalnaya proektno-issledovatel'skaya terminologiya [Architectural and Urban Planning Design] : uchebnoe posobie. Chast 1. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, NNGASU, 2025, 281 p. ISBN 978-5-528-00612-3. ISBN 978-5-528-00616-1.
7. Krashennnikova E. S., Norenkov S. V., Shilin V. V. Arkhitekturno-gradostroitelny dizayn : sinfilosofiya kulturekonomiki zodchestva [Architectural and Urban Planning Design : synphilosophy of the cultural economics of architecture]: (professionalnaya proektno-issledovatel'skaya terminologiya). Chast 2. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, NNGASU, 2025, 293 p. ISBN 978-5-528-00612-3. ISBN 978-5-528-00620-8.
8. Orlova L. N., Norenkov S. V., Denisova V. A. Kompleksnoe razvitiye territoriy: otechestvennaya praktika proektnoy realizatsii v ramkakh gosudarstvennykh programm [Comprehensive territorial development: domestic practice of design implementation within the framework of state programs]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.- stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2024, № 1 (69), P. 244–252.
9. Orlova L. N., Denisova V. A. Obshchestvennye prostranstva v kontseptsyakh kompleksnogo razvitiya territoriy [Public spaces in the concepts of comprehensive territorial

development]. *Privolzhskiy nauchny zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.- stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2025, № 1 (73), P. 227–233.

10. Lisitsyna A. V. Istoriko-arkhitekturnaya sreda «pogranichnykh» gorodov Nizhegorodskogo Povolzhya [Historical and architectural environment of the "border" cities of the Nizhny Novgorod Volga region]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [News of the Kazan State University of Architecture and Engineering]. Kazan, 2016, № 2, P. 39–48. ISSN 2073-154X.

11. Zastroyka po KRT v Nizhnem Novgorode [Development under Comprehensive Territorial Development in Nizhny Novgorod]: pervye itogi i plany na 2025 god. URL: <https://www.gipernn.ru/zhurnal/razvitie-regiona/stati/zastroyka-po-krt-v-nizhnem-novgorode-pervye-itogi-i-plany-na-2025-god>.

12. Orelskaya O. V. Stilisticheskiy vektor noveyshey regionalnoy arkhitektury (na primere Nizhnego Novgoroda) [Stylistic vector of the newest regional architecture (case study of Nizhny Novgorod)]. *Fundamentalnye, poiskovye i prikladnye issledovaniya Rossiyskoy akademii arkhitektury i stroitel'nykh nauk po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitelstva i stroitel'noy otrasli Rossiyskoy Federatsii v 2018 godu* [Fundamental, exploratory and applied research of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences for the scientific support of the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2018] : sbornik nauchnykh trudov. Moscow, 2019, P. 121–138.

© Л. Н. Орлова, С. В. Норенков, Е. С. Крашенинникова, 2026

Получено: 25.12.2025 г.



УДК 72.025.4(470.341-25)

А. С. ШУМИЛКИН^{1,2}, д-р архитектуры, доц. кафедры истории архитектуры и основ архитектурного проектирования, гл. архитектор;
С. М. ШУМИЛКИН¹, д-р архитектуры, проф., зав. кафедрой истории архитектуры и основ архитектурного проектирования

НИЖЕГОРОДСКАЯ АРХИТЕКТУРНО-РЕСТАВРАЦИОННАЯ ШКОЛА XXI ВЕКА

¹ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-17-37; эл. почта: ist_arh@nngasu.ru

²ООО «АСГАРД».

Россия, 603000, г. Н. Новгород, ул. Нижневолжская наб., д. 11.

Тел.: (831) 434-21-07; эл. почта: info@asgard-arch.ru

Ключевые слова: нижегородская архитектурно-реставрационная школа, объект культурного наследия, кластерный подход.

В статье рассматриваются особенности нижегородской архитектурно-реставрационной школы, обусловленные типологически и стилистически разнообразным наследием, профессиональной преемственностью, развитием научной базы и принципов реставрации в современной реставрационной практике. Выявляются актуальные тенденции в сохранении и раскрытии культурного потенциала Нижегородского региона, в том числе связанные с реализацией кластерно-территориального подхода в реставрации.

Нижегородская земля обладает значительным историко-культурным наследием. Достаточная близость к административно-политическому и финансовому центру страны, большой территориальный охват, богатый типологический и стилистический состав наследия – эти факторы обусловили формирование во второй половине XX в. школы архитектурной реставрации. Начальный этап ее развития связан с созданием Горьковской специальной научно-реставрационной производственной мастерской (ГСНРПМ) в 1957 г. и формированием ее профессионального состава во главе с основателем и лидером школы архитектором-реставратором С. Л. Агафоновым. Несколько десятилетий работ на памятниках региона, важнейшие из которых – восстановление ансамбля Нижегородского кремля, сохранение культовых и гражданских построек, монастырских комплексов, реставрация памятников народной архитектуры, – составили «золотой век» нижегородской реставрации [1, 2].

Новый этап на рубеже XX–XXI вв., отмеченный реорганизацией и общим кризисным состоянием отрасли, стал сложным, но значимым для сохранения высокого профессионального статуса нижегородской школы. Сейчас на территории области находится около 7100 объектов культурного наследия (ОКН) и действует более 20 организаций, которые составляют сеть частных архитектурно-реставрационных мастерских. Эти организации наследовали традиции реставрации предыдущего периода благодаря сохранению кадрового состава за счет перехода сотрудников ГСНРПМ и занятия ими руководящих

позиций, формирования плеяды последователей, развития научной базы и методологии в новых условиях архитектурно-реставрационной практики. Важнейшим фактором является ведущая роль Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета как высшей школы, объединяющей теорию реставрации и практику. Концептуальные взгляды, основанные на принципах научной обоснованности в рамках аналитического подхода, стремлении к восстановлению композиционной целостности памятников архитектуры, контекстуальном подходе в сохранении архитектурной среды города, – факторы, задающие вектор развития нижегородской школы архитектурной реставрации в XXI в.

Анализируя практику 2000–2020-х гг. важно отметить, что в сферу восстановительных работ стал включаться более широкий круг памятников Н. Новгорода и области, ранее остававшийся за пределами научной реставрации: жилые и общественные постройки классицизма, эклектики, модерна, конструктивизма, промышленная архитектура. Работы приобрели комплексный характер, обусловленный задачами приспособления ОКН для современного использования. Направленность работ сместилась от точечного восстановления отдельных памятников в сторону их актуализации и включения в развивающееся городское пространство.

К исследуемому периоду принадлежит ряд работ нижегородской архитектурно-реставрационной школы на крупных и знаковых объектах исторического центра: Здание Нижегородского острога начала XIX в. на площади Свободы, Здание Областного суда на ул. Б. Покровской, Центральный банк на ул. Б. Покровской и Главный ярмарочный дом на ул. Совнаркомовской, Комплекс банка Рукавишниковых на Нижневолжской набережной и другие объекты (рис. 1 цв. вклейки).

Масштабный комплекс работ был осуществлен при реставрации и приспособлении кремлевского Арсенала – одного из самых значительных в Нижнем Новгороде сооружений позднего классицизма первой половины XVIII в. (рис. 1 цв. вклейки) Строение, расположенное между Дмитриевской и Пороховой башнями, принадлежало военному ведомству и долгое время было скрыто для широкого показа. Концепция проекта, реализованного в 2007–2014 гг. московскими и нижегородскими архитекторами, предусматривала реставрацию первоначального облика памятника с приспособлением его под Волго-Вятский филиал ГЦСИ. В рамках инженерной реставрации выполнено усиление фундаментов, устроен монолитный железобетонный каркас, воссоздана стропильная система и конструкции деревянных ферм. Проведена реставрация фасадов с восстановлением исторических деталей и фасадной отделки. Приспособление здания сопровождалось изменениями во внутренней объемно-пространственной структуре. В центральной части устроено двухсветное пространство с остекленными антресолями, дополнительные конструкции-этажерки, мансардные этажи над боковыми ризалитами, подвальный этаж [3].

В нижегородскую практику вошли примеры полноценной комплексной реставрации памятников жилой архитектуры – городских усадеб и особняков эклектики, модерна, неоклассицизма, формирующих самобытный облик купеческого Нижнего. Один из примеров – Особняк Маркова на ул. Ильинской с архитектурным обликом в духе флорентийского палаццо и уникальными парадными интерьерами в ренессансной стилистике с чертами модерна. В ходе

реставрации первоначального облика памятника в 2008–2009 гг. были восстановлены ценные исторические интерьеры с беломраморной лестницей, витражами, деревянными резными панелями, декоративной лепкой стен и потолков [4]. Благодаря проведенным масштабным реставрациям в культурное пространство города были возвращены и другие замечательные памятники с художественными интерьерами – особняк Усадьбы Рукавишникова и Дом Сироткина на Верхне-Волжской набережной, Особняк Бурмистровой на ул. Минина (рис. 2 цв. вклейки).

Обширную группу объектов нижегородской реставрационной школы составили памятники культовой архитектуры, в большинстве отмеченные разрушениями и утратами советского периода. После передачи церковей Епархии были начаты работы по возрождению этой части наследия: восстановлению целостной композиции, семантики православных храмов и монастырей с возвращением им первоначальной функции (рис. 3 цв. вклейки). Характерными примерами работ периода стало восстановление ансамбля церкви Иоанна Предтечи на Нижнем посаде, ансамбля Крестовоздвиженского монастыря, Алексеевской церкви Благовещенского монастыря, Владимирской церкви в Гордеевке [5]. В Нижегородской области восстанавливались архитектурные комплексы Свято-Троицкого Серафимо-Дивеевского, Дудина, Федоровского, Оранского монастырей.

Важнейшие работы исследуемого периода сосредоточились на самом древнем и значимом памятнике – Нижегородском кремле XVI в. и на объектах, расположенных на его территории. В концепции своего главного проекта по возрождению кремлевского ансамбля во второй половине XX в. С. Л. Агафонов предусматривал воссоздание утраченных элементов фортификационного комплекса, продиктованное задачами восстановления его градостроительной роли [6]. Однако до 2000-х гг. кремлевское «кольцо» оставалось незамкнутым в подгорной части в месте разрушившейся Зачатской башни и прилегающих прясел. В ходе восстановительных работ, проведенных нижегородскими реставраторами, башня была воссоздана (рис. 4 цв. вклейки). Ее облик восстановлен по архивным документам с использованием аналогов исторического материала и технологий: большемерного полнотелого кирпича с облицовкой белым камнем, тесового кровельного покрытия. Археологические фрагменты первоначального основания башни при реставрации были законсервированы под стеклянной экспозиционной конструкцией [7].

Беспрецедентный объем работ по восстановлению Нижегородского кремля и объектов исторического центра был связан с подготовкой к 800-летию юбилею города. Особенностью этого этапа стала реализация кластерно-территориального подхода, предполагающего работы по реорганизации масштабного фрагмента городского пространства («кластера») с актуализацией современного «прочтения» его объектов и образно-художественным обогащением среды. Градоформирующая роль кремля как древнейшего оборонного сооружения в сочетании с уникальным природным ландшафтом обеспечила приоритет сохранения памятника в единстве культурного, архитектурного, природно-ландшафтного каркаса.

Проводились мероприятия по инженерной реставрации крепостных сооружений. Выполнено приспособление под экспозиционные функции Борисоглебской и Георгиевской башен с участками стен между ними.

**К СТАТЬЕ А. С. ШУМИЛКИНА, С. М. ШУМИЛКИНА
«НИЖЕГОРОДСКАЯ АРХИТЕКТУРНО-РЕСТАВРАЦИОННАЯ ШКОЛА
XXI ВЕКА»**



Рис. 1. Реставрационные работы на объектах общественной архитектуры:

1 – Здание Арсенала в Нижегородском кремле, 2007–2014 гг. 2 – Волжско-Камский банк на ул. Рождественской, 2001 г. 3 – Комплекс банка Рукавишниковых на Нижневолжской наб, 2022 г. 4 – Здание Областного суда на ул. Б. Покровской, 2010-е гг. 5 – Главный ярмарочный дом на ул. Совнаркомовской, 2017–2018 гг.

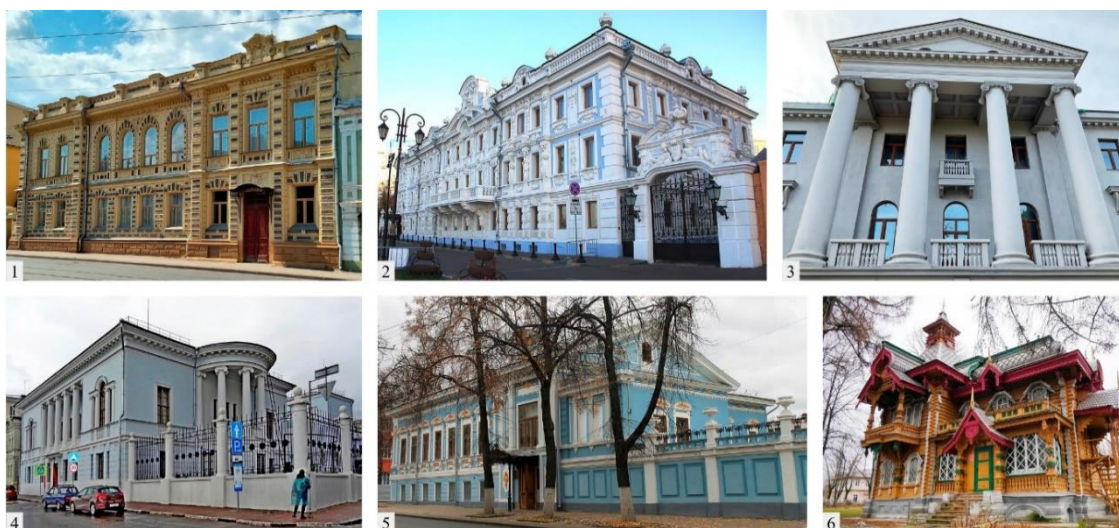


Рис. 2. Реставрационные работы на объектах жилой архитектуры:

1 – Особняк Марковых на ул. Ильинской, 2009 г. 2 – Главный дом усадьбы Рукавишникова на Верхне-Волжской наб., 2007–2010 гг. 3 – Особняк Каменской на Верхне-Волжской наб., 2018 г. 4 – Особняк Сироткина на Верхне-Волжской наб., 2010-е гг. 5 – Дом Бурмистровой на ул. Минина, 2019 г. 6 – Летняя дача Бугрова в Володарске, 2002–2006 гг., с 2023 г.

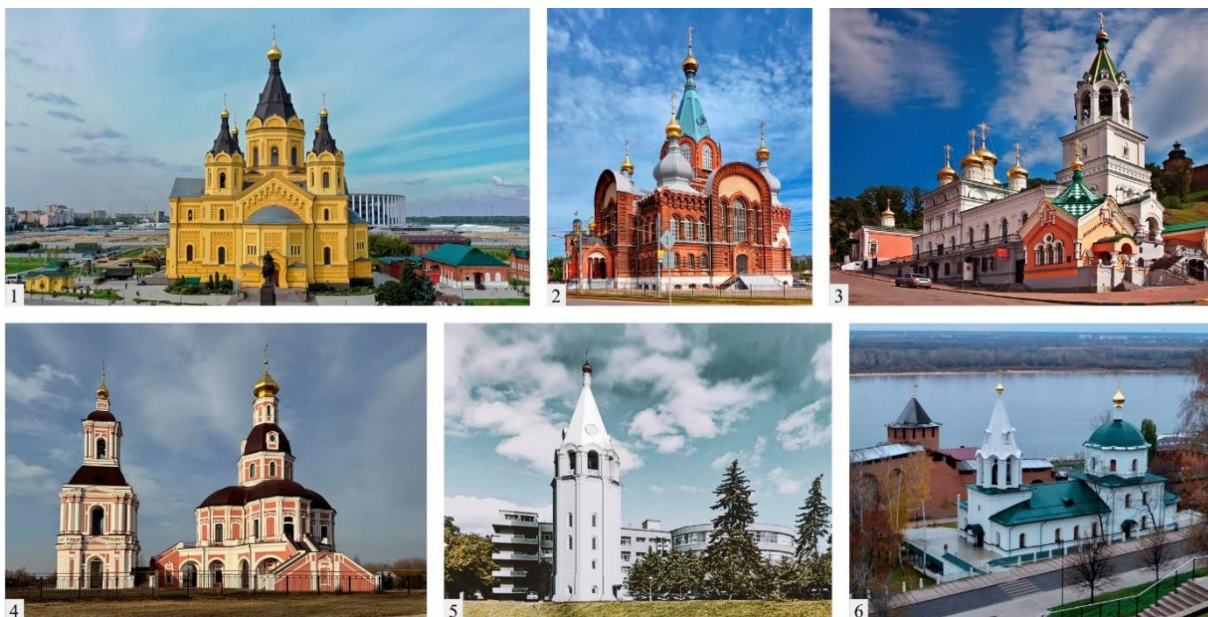


Рис. 3. Реставрационные работы на объектах культовой архитектуры:

1 – Собор Александра Невского на Стрелке, 1992–2000-е гг. 2 – Владимирская церковь в Гордеевке, 2006 г. 3 – Ансамбль церкви Иоанна Предтечи на Нижнем Посаде, 2005 г. 4 – Церковь Иоанна Предтечи в с. Хирино, 2000-е гг. 5 – Колокольня Спасо-Преображенского собора в Нижегородском кремле, 2021 г. 6 – Церковь Симеона Столпника в Нижегородском кремле, 2021 г.

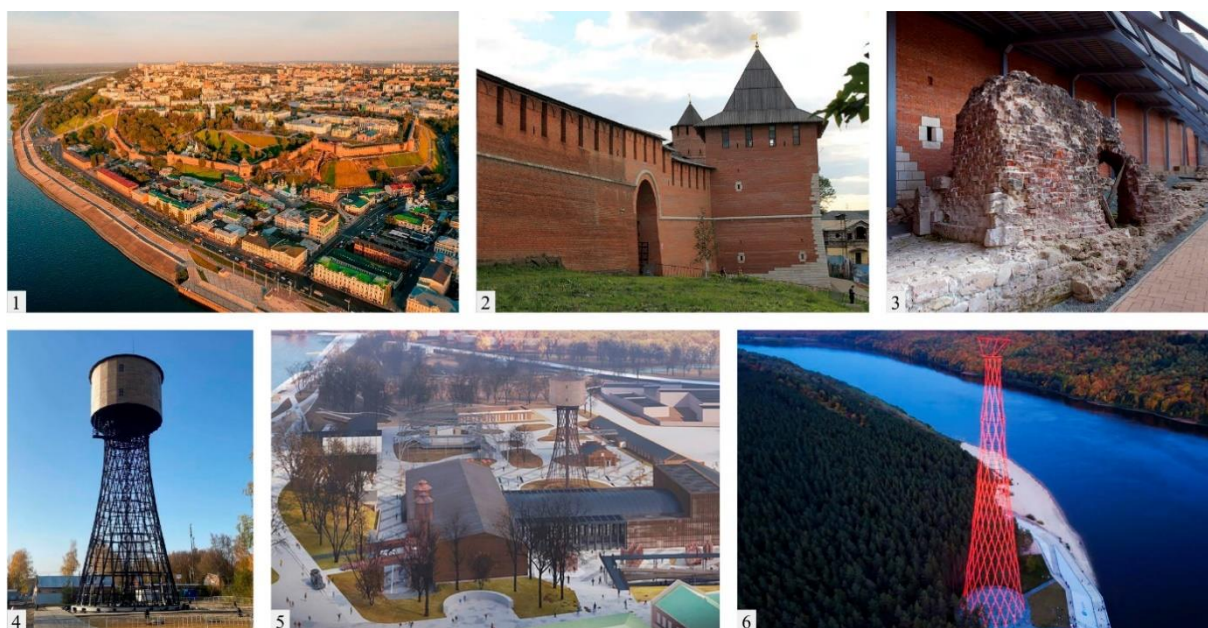


Рис. 4. Реставрационные работы на объектах фортификационной и промышленной архитектуры:

1 – Нижегородский кремль, 2021 г. 2, 3 – Зачатская башня Нижегородского кремля, 2010 г. 4, 5 – Водонапорная башня Шухова, восстановленная на территории Шухов-Парка в Выксе, 2025 г. 6 – Гиперboloидная многосекционная опора ЛЭП на Оке, 2000-е, 2010-е гг.

Значительные работы были связаны с реставрацией и приспособлением для современного использования кремлевских объектов общественной архитектуры. Реставрация Губернаторского дома первой половины XIX в. (здания НГХМ) включала не только восстановление парадного облика памятника позднего классицизма, но и восполнение его фрагментарно утраченных художественных интерьеров. Комплекс работ по реставрации и приспособлению был проведен на Здании Присутственных мест конца XVIII в., в прошлом формировавшем западную сторону плац-парадной площади в структуре кремлевского ансамбля. Сохранение памятника предусматривало реставрацию интерьеров с восстановлением декоративной отделки, а также актуализацию внутреннего пространства той его части, в которой расположена Нижегородская филармония. Схожий характер имели реставрационные работы на Казармах гарнизонного батальона рубежа XVIII–XIX вв. – выразительном образце классицизма в центральной части кремлевского ансамбля (рис. 4 цв. вклейки). Рассмотренные примеры комплексной реставрации характеризовались изменением преобладающей административной функции ОКН на выставочную в контексте развития Кремля как культурного кластера.

Особый вид реставрационных работ был связан с научным воссозданием объектов культовой архитектуры в Кремле, разрушенных в советское время. На северо-восточном откосе Кремлевского холма на историческом месте была воссоздана колокольня Спасо-Преображенского собора. Восстановленная по архивным графическим источникам, колокольня в виде восьмигранного ярусного столпа с шатровым завершением стала новой градостроительной доминантой в панораме кремля и, одновременно, памятником-символом утраченного Спасо-Преображенского собора первой половины XIX в. При воссоздании реставраторы ориентировались на подлинный облик, применив аутентичные материалы и технологии – мозаичные вставки, обмазку «под рукавицу» известковым раствором. Также в архитектурном каркасе Кремля были воссозданы церковь Николая Чудотворца при Военном манеже и Церковь Симеона Столпника. Церковь Симеона Столпника XVIII в. – значимая градостроительная доминанта, формирующая речную панораму города. Храм был возведен на террасе рядом с Белой башней. В XIX в. проводились перестройки, изменившие первоначальный облик памятника, а в 1928 г. храм был разрушен. Проект воссоздания предполагал восстановление церкви по иконографическим данным в том виде, который она имела в начале XIX в. (рис. 3 цв. вклейки) [8].

Важным направлением последнего времени становится сохранение и реставрация объектов промышленной архитектуры. Уникальный опыт в масштабе не только нижегородской, но и российской практики, связан с сохранением памятников инженерного искусства – гиперболоидных башен авторства В. Г. Шухова в Выксе и на Оке (рис. 4 цв. вклейки).

Рассмотренные примеры иллюстрируют важный принцип нижегородской школы архитектурной реставрации на современном этапе – коллегиальность, профессиональную преемственность, сохранение научной методологии и выработку новых подходов в актуальных условиях архитектурно-реставрационной практики. Среди реставрационных организаций, внесших профессиональный вклад в ее развитие в 2000-е–2020-е гг. – коллективы МП «Проектреставрация», Научно-исследовательского предприятия «Этнос», ЗАО ТИК «Старый Нижний Новгород», ЗАО «СМУ-77», Архитектурного бюро



«Этюд», Нижегородского научно-производственного центра «Практика», Архитектурной мастерской ННГАСУ, ООО «Региональный инженерный центр», ООО «АСГАРД», ООО «АР ГРУПП».

Анализ деятельности нижегородской архитектурно-реставрационной школы позволяет выявить ее тенденции и перспективы в XXI в. Актуальное направление связано с переходом от точечной реставрации к кластерно-территориальной модели, синтезирующей наибольший спектр реставрационных методов в решении задач сохранения и устойчивого развития культурного ландшафта. Отмечается комплексный научный характер реставрационной практики в соответствии с задачами актуализации и современного использования ОКН. Развитие актуальных программ и сценариев работы с наследием в рамках приоритетных финансово-туристических задач, «событийный подход» [9–10] становится тем драйвером, который придает сфере реставрации важнейшее значение в сохранении и раскрытии культурного потенциала Нижегородского региона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Орельская, О. В. Святослав Агафонов. Возродивший кремль / О. В. Орельская. – Нижний Новгород : Промграфика, 2001. – 192 с. : ил. – (Мастера нижегородской архитектуры). – ISBN 5-901915-01-1.
2. Шумилкин, С. М. Этапы нижегородской реставрации XX века / С. М. Шумилкин // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2019. – № 3. – С. 106–113.
3. Игнатушко, М. Награда за воплощение мечты. – URL: <https://archi.ru/russia/65584/arsenal?ysclid=ltfnut16ht490855586>. – Текст : электронный.
4. Шумилкин, С. М. Особняк А. В. Маркова – образец архитектуры эклектики начала XX в. / С. М. Шумилкин // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2010. – № 3. – С. 141–149.
5. Шумилкин, С. М. Владимирская церковь в Нижнем Новгороде – памятник архитектуры начала XX в. / С. М. Шумилкин, М. С. Шумилкин // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2018. – № 2. – С. 135–143.
6. Агафонов, С. Л. Нижегородский кремль / С. Л. Агафонов ; под редакцией И. С. Агафоновой, А. И. Давыдова. – 3-е изд., доп. и перераб. – Нижний Новгород : Кварц, 2019 – 240 с. : ил. – К 800-летию Нижнего Новгорода. – ISBN 978-5-903581-19-1.
7. Давыдов, А. И. Зачатская башня Нижегородского кремля / А. И. Давыдов, В. В. Краснов. – URL: <https://opentextnn.ru/space/nn/kremlin/davydov-a-i-krasnov-v-v-zachatskaja-bashnja-nizhegorodskogo-kremlja/> (дата обращения: 15.03.2026). – Текст : электронный.
8. Хмелевская, Д. Д. Воссоздание утраченных исторических архитектурных объектов в Нижнем Новгороде / Д. Д. Хмелевская // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2023. – № 4. – С. 183–188.
9. Романова, А. А. Событийная реставрация на примере преобразований Нижнего Новгорода к 800-летию города / А. А. Романова, Т. В. Шумилкина // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2024. – № 2. – С. 151–155.
10. Матвеев, Б. М. Деконструкция архитектурного наследия / Б. М. Матвеев. – Санкт-Петербург : Политехника-сервис, 2012 – 423 с. : ил. – ISBN 978-5-905687-63-1.



SHUMILKIN Aleksandr Sergeevich^{1,2}, doctor of architecture, associate professor of the chair of history of architecture and fundamentals of architectural design, chief architect; SHUMILKIN Sergey Mikhailovich¹, doctor of architecture, professor of the chair of history of architecture and fundamentals of architectural design

NIZHNY NOVGOROD ARCHITECTURAL AND RESTORATION SCHOOL OF THE 21st CENTURY

¹Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel: (831) 430-17-37; e-mail: ist_arh@nngasu.ru

²ASGARD LLC.

11, Nizhnevolzhskaya Embankment, Nizhny Novgorod, 603000, Russia.

Tel: (831) 434-21-07; e-mail: info@asgard-arch.ru

Key words: Nizhny Novgorod architectural and restoration school, cultural heritage site, cluster approach.

The article examines the distinctive features of the Nizhny Novgorod architectural and restoration school, which are determined by the typologically and stylistically diverse heritage, the preservation of professional continuity, and the development of its research foundation and fundamental principles of restoration in modern restoration practice. The article identifies current trends in the preservation and development of the cultural potential of the Nizhny Novgorod region, including those related to the implementation of a cluster-based approach to restoration.

REFERENCES

1. Orejskaya O. V. Svyatoslav Agafonov. Vozrodivshiy kreml [Svyatoslav Agafonov. The Man Who Revived the Kremlin]. Nizhny Novgorod, Promgrafika, 2001, 192 p.: il.
2. Shumilkin S. M. Etapy nizhegorodskoy restavratsii XX veka [Stages of Nizhny Novgorod restoration of the twentieth century]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2019, № 3, P. 106–113.
3. Ignatushko M. Nagrada za voploshcheniye mechty [The reward for making a dream come true]. URL: <https://archi.ru/russia/65584/arsenal?ysclid=ltfnut16ht490855586>.
4. Shumilkin S. M. Osobnyak A. V. Markova – obrazets arkhitektury eklektiki nachala XX v. [A. V. Markov Mansion is an example of early 20th-century eclectic architecture.]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2010, № 3, P. 141–149.
5. Shumilkin S. M., Shumilkin M. S. Vladimirskaia tserkov v Nizhnem Novgorode – pamaytnik arkhitektury nachala XX veka [Vladimir's church in Nizhny Novgorod – an architectural monument of the beginning of the XX century]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2018, № 2, P. 135–143.
6. Agafonov S. L. Nizhegorodskiy kreml [The Nizhny Novgorod Kremlin] : pod red. I. S. Agafonovoy, A. I. Davydova. 3-e izd., dop. i pererab. Nizhny Novgorod. Quartz, 2019, 240 p. : il. – ISBN 978-5-903581-19-1. – K 800-letiyu Nizhnego Novgoroda.
7. Davydov A. I., Krasnov. V. V. Zachatskaya bashnya Nizhegorodskogo kremlya [The Zachatskaya Tower of the Nizhny Novgorod Kremlin]. URL: <https://opentextnn.ru/space/nn/kremlin/davydov-a-i-krasnov-v-v-zachatskaja-bashnja->



nizhegorodskogo-kremlja.

8. Khmelevskaya D. D. Vossozdanie utrachennykh istoricheskikh arkhitekturnykh obektov v Nizhnem Novgorode [Reconstruction of lost historical architectural objects in Nizhny Novgorod]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2023, № 4, P. 183–188.

9. Romanova A. A., Shumilkina T. V. Sobytiynaya restavratsiya na primere preobrazovaniy Nizhnego Novgoroda k 800-letiyu goroda [Event-based restoration using the example of Nizhny Novgorod's transformation for the city's 800th anniversary]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2024, № 2, P. 151–155.

10. Matveyev B. M. Dekonstruksiya arkhitekturnogo naslediya [Deconstruction of architectural heritage]. Saint Petersburg, Politechnica-service, 2012, 423 p., ill.

© А. С. Шумилкин, С. М. Шумилкин 2026

Получено: 14.04.2026 г.



УДК: 72.025 :72.03(532)

А. ФИЛЛАЛИ, аспирант кафедры «Градостроительство»; **Е. А. АХМЕДОВА**, академик РААСН, д-р архитектуры, проф. кафедры «Градостроительство»; **А. В. АДОНИНА**, канд. архитектуры, доц. кафедры «Градостроительство»

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И КОМПЛЕКСНАЯ АРХИТЕКТУРНО-ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СОХРАНЕНИЯ И РАЗВИТИЯ АРХИТЕКТУРНОЙ СРЕДЫ ИСТОРИЧЕСКИХ КВАРТАЛОВ ЭР-РИЯДА

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, Главный корпус.

Тел.: (846) 339-14-05; факс: (846) 278-44-00; эл. почта: dir_inst_arch@bk.ru

Ключевые слова: традиционная архитектура Неджди, регенерация архитектурно-исторической среды, научная реставрация и музеефикация, адаптивное использование наследия, исторический район Дирия.

В статье предложена авторская методика комплексной архитектурно-пространственной оценки сохранения и развития архитектурной среды исторических кварталов Эр-Рияда на примере исторического района Дирия, его важнейших фрагментов: Аль-Турайф и Буджаири. Авторами анализируются архитектурно-пространственные, функционально-экономические, социально-культурные, композиционно-пространственные предпосылки развития архитектурно-исторической среды Дирии как целостного образно-смыслового пространства. Кратко излагаются планы первых этапов реализации концепции архитектурно-пространственной трансформации.

Введение

Статья посвящена анализу концепции сохранения и развития архитектурной среды исторических кварталов крупного города – столицы Королевства Саудовская Аравия (КСА) – города Эр-Рияда в условиях пространственной связи с объектами общегородского центра. В работе рассматриваются теоретико-методологические подходы к сохранению подлинности (аутентичности) историко-архитектурного наследия в контексте его интеграции в структуру современного мегаполиса. Рассматривается Проект Дирия – один из 10 уникальных проектов королевства – как крупная инициатива в историческом районе, расположенном на окраине Эр-Рияда. Целью проекта является восстановление и возрождение Дирии как культурного и туристического направления, сохраняя при этом ее богатую историю. Дирия в целом и ее фрагменты, такие как Аль-Турайф, Буджаири, имеют большое историческое и культурное значение для Королевства Саудовская Аравия. Это был первоначальный дом королевской семьи Аль Сауд и первая столица первого саудовского государства в 18 веке. Проект направлен на создание баланса между сохранением исторической целостности Дирии и предоставлением современных удобств и комфорта для привлечения посетителей. Одной из наиболее ярких особенностей проекта Дирия является проект «Ворота Дирии», цель которого: превращение исторического района с традиционной архитектурой в центр культуры и образа жизни мирового уровня. Проект «Ворота Дирии» включает в



себя восстановление многих исторических объектов, таких как традиционная архитектура жилищ, мечетей и общественно-торговых зданий района Аль-Турайф, внесенного в список Всемирного наследия ЮНЕСКО, в сочетании с адаптивной современной архитектурой творческих факультетов, музеев, художественных галерей, офисов, ресторанов, магазинов и торгово-развлекательных заведений в районе Буджаири. Конечная цель проекта Дирия – продвижение культурного туризма, стимулирование местной экономики и демонстрация богатого наследия Саудовской Аравии местным и международным гостям. Это часть более широкой инициативы «Видение 2030», направленной на диверсификацию экономики Саудовской Аравии и снижение ее зависимости от нефти.

Аль-Турайф – это сердце культуры Дирии. Она была построена в 1766 году и в 2010 году была внесена в список Всемирного наследия ЮНЕСКО. Комплексная оценка архитектурного наследия данного объекта требует применения системного инструментария, позволяющего зафиксировать не только материальные параметры застройки, но и ее когнитивно-пространственные характеристики, определяющие идентичность места. В ее стенах жила королевская семья Саудовской Аравии под руководством имама Мухаммада бин Сауда, пятого дедушки Хранителя Двух Святынь короля Салмана бин Абдель Азиза Аль Сауд.

Дирия сегодня как девелоперский проект стоимостью 17 миллиардов долларов, занимает площадь в 7 квадратных километров. Масштабные инвестиции в данном случае направлены не только на коммерческий девелопмент, но и на научную регенерацию утраченных архитектурных морфотипов застройки и воссоздание уникальных тектонических характеристик стиля Неджди. Историческое, культурное и высококлассное место для жизни Дирия – историческое и культурное сердце Королевства, район Эр-Рияда, с гордостью демонстрирующий более чем 300-летнюю историю. Он находится в процессе реконструкции традиционной жилой, культовой и общественно-административной архитектуры и воссоздания новой международной достопримечательности в архитектурном стиле Неджди, чтобы показать подлинный саудовский стиль. Цель состоит в том, чтобы реализовать устойчивое городское развитие смешанного назначения, вдохновленное принципами как нового урбанизма, так и исторической архитектуры Неджди. Дирия станет домом для более двадцати ультра-роскошных отелей, предлагающих аутентичные впечатления, отражающие богатую историю и культуру Королевства. В конечном итоге в комплекс войдут архитектурные объекты новых типологий – музеи, галереи, рестораны, магазины розничной торговли, общественные площади, отели, многочисленные развлекательные заведения, жилые помещения, образовательные учреждения и офисы.

1. Материалы и методы исследования

Королевство Саудовская Аравия уделяет много внимания разработке современного законодательства в сфере охраны историко-культурного наследия страны и формирования образа государства, ориентированного как на изучение недвижимых памятников культуры – объектов археологии и исторической архитектуры, так и на объекты так называемого движимого наследия – на памятники истории и религии, памятники искусства, документальные памятники и другие объекты, представляющие научную и историческую ценность. В то же время в стране продвигаются и реализуются проекты современной архитектуры

на основе новейших строительных технологий. Эти два направления деятельности представляют собой взаимосвязанное диалектическое единство, в рамках которого и развивается градостроительная и строительная отрасли в стране. Рассмотрим подробнее, какие государственные планы КСА являются предпосылками сохранения и развития архитектурно-исторической среды Дирии как целостного образно-смыслового пространства.

Первое и важное – сформирован пул из 10 уникальных проектов Королевства Саудовская Аравия, воплощение которых продвигается на государственном уровне для демонстрации достижений в сфере архитектуры, строительства и инженерных технологий, сохранения историко-культурного наследия. В состав уникальных проектов включены: Парк короля Салмана, Ворота Дирии, Спортивный бульвар в Эр-Рияде, Финансовый район короля Абдаллы, Всемирная выставка «Экспо 2030», НЕОМ, Линия, Ак-Ула, Район Аль-Турайиф в Дирии и ряд других амбициозных программ [1, 2]. Как видно из этого списка, в нем есть и высокотехнологичные футуристические объекты нового строительства – как, например, зеленые «города будущего» – НЕОМ и Линия, которые более подробно рассмотрены в исследовании 2023 года магистра архитектуры А. Филлали, так и архитектурные и археологические памятники историко-культурного наследия [3], которыми богата эта древняя земля. Регулирование управления Системой памятников, музеев и городского наследия опирается на государственное законодательство, в котором зафиксированы основные принципы этой деятельности [2]:

- *– археологические памятники и городское наследие должны быть сохранены при разработке, расширении или украшении проектов городского и деревенского планирования;

- *– должны быть приняты во внимание права сервитута, в том числе создание незастроенной защитной зоны вокруг этих объектов по согласованию с Министерством муниципальных и сельских дел; проекты планировки в их объеме не могут быть одобрены, кроме как после получения одобрения Управления (Управления развития Арриаяда (*ADA*));

- *– разрешения на строительство или реставрацию не могут быть выданы на территориях, прилегающих к объектам археологического и городского наследия, кроме как по согласованию с Управлением;

- *– на территории объектов археологического и городского наследия запрещается проводить любые из следующих работ без предварительного разрешения Управления:

- А – Полный или частичный снос.

- Б – Расширение услуг водоснабжения, электричества, газа и связи, дорожные работы и все то, что может изменить внешний вид археологических памятников, городского наследия и построек в них или изменить состав их археологических слоев.

- В – Любая новая работа, связанная со строительством, дизайном территории и ландшафтным дизайном [2].

Анализ данных законодательных норм показывает переход от точечной охраны архитектурных объектов к средовому подходу, где защите подлежит не только здание, но и культурный ландшафт, включая визуальные коридоры и археологические слои. Это создает нормативную базу для научной реставрации Дирии как целостного ансамбля.

**К СТАТЬЕ А. ФИЛЛАЛИ, Е. А. АХМЕДОВОЙ, А. В. АДОНИНОЙ
«ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И КОМПЛЕКСНАЯ
АРХИТЕКТУРНО-ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СОХРАНЕНИЯ И
РАЗВИТИЯ АРХИТЕКТУРНОЙ СРЕДЫ
ИСТОРИЧЕСКИХ КВАРТАЛОВ ЭР-РИЯДА**

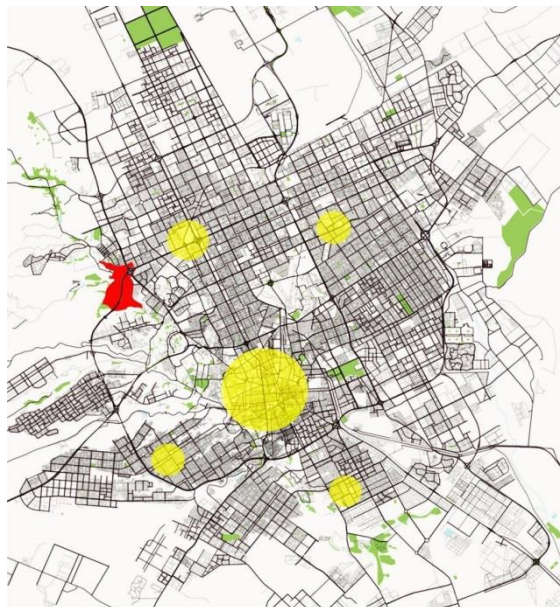


Рис. 1. Исторический район Дирия в структуре современного Эр-Рияда [6] [Королевская комиссия по городу Эр-Рияд yandex.com]



Рис. 2. Проект развития исторического района Дирии [12, 15] [www.skyscrapercity.com]

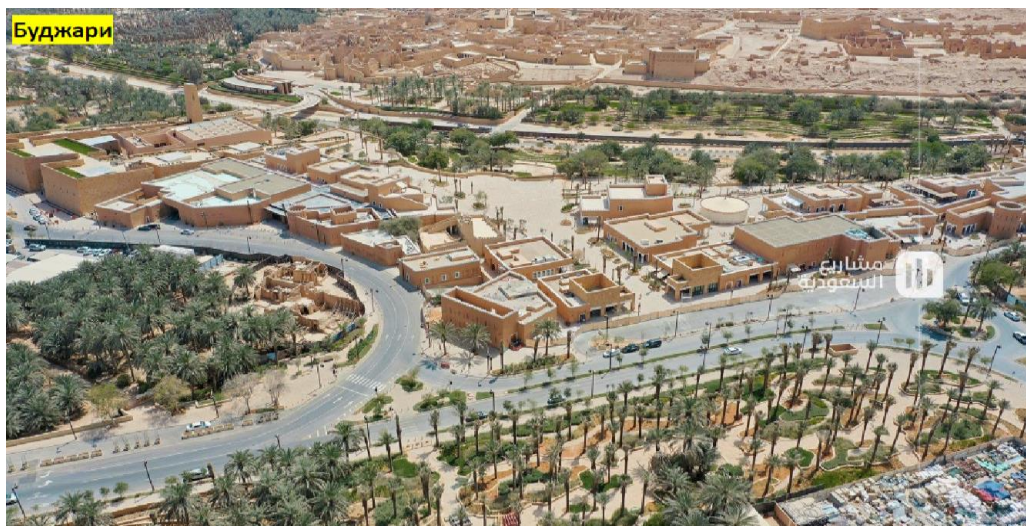


Рис. 3. Район Аль-Буджаири [8] [alarabiya.net]



Рис. 4. Район Аль-Буджаири в исторической Дирии [www.almrsl.com]



Рис. 5. Традиционная архитектура в исторических кварталах Буджаири и Аль-Тураифа



Рис. 6. Исторический район Аль-Тураиф в Дирия [www.islamicarchitecturalheritage.com]

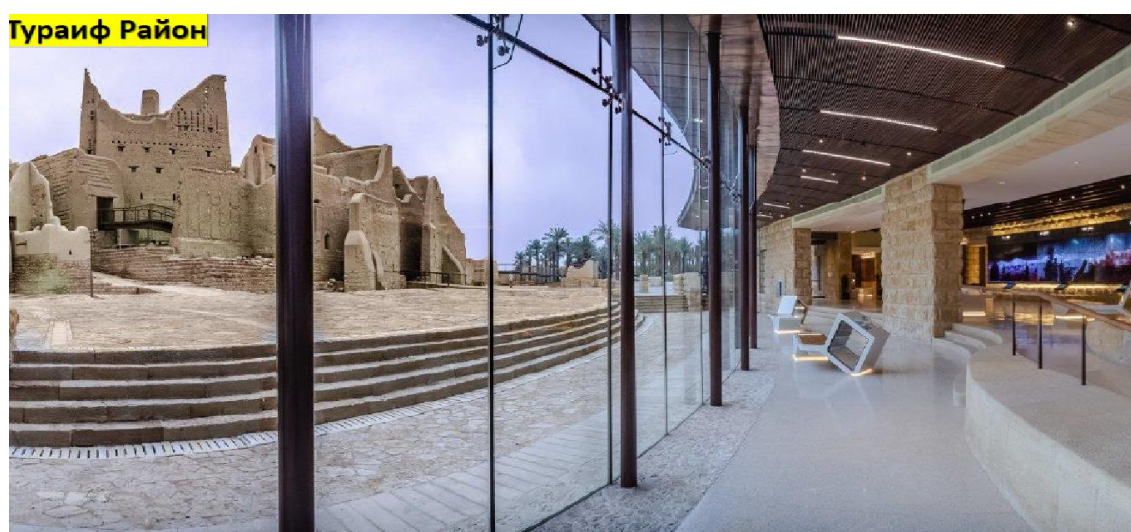


Рис. 7. Внесенный в список ЮНЕСКО Аль-Тураиф [6] [www.thenationalnews.com]

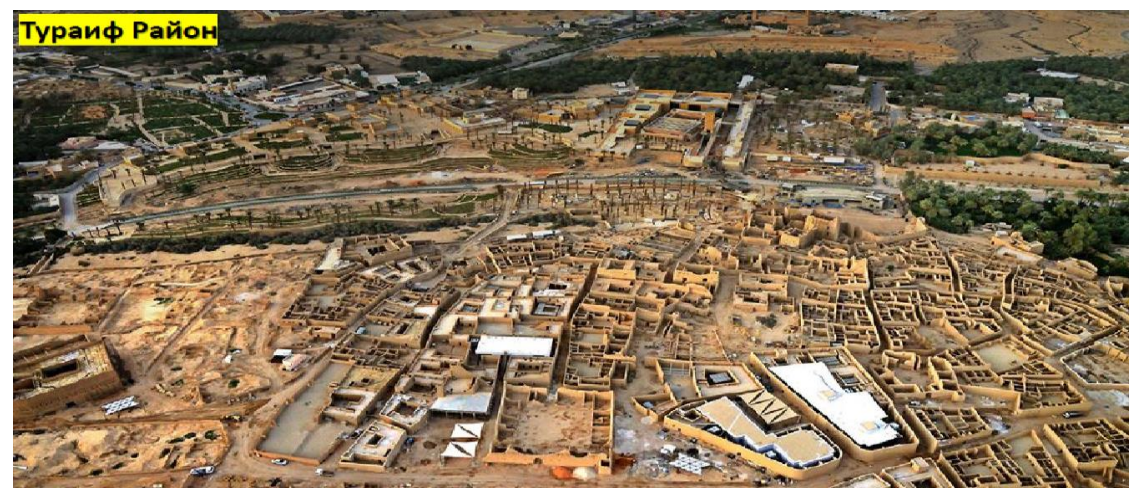


Рис. 8. Вид сверху на Аль-Тураиф и за долинкой Буджаири [6] [rcrc.gov.sa]



Рис. 9. Мост шейха Мохаммеда бин Абдель Ваххаба [13] [www.al-jazirah.com]

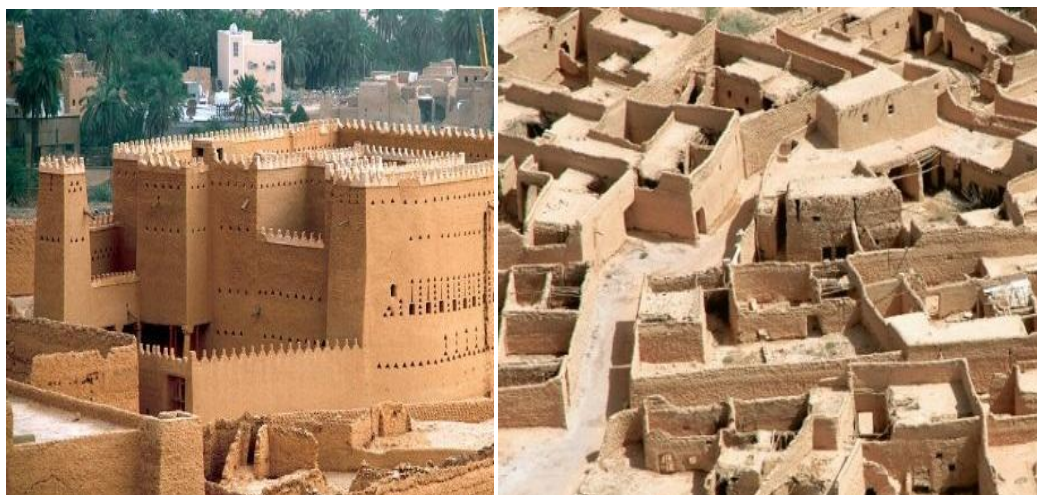


Рис. 10. Здания, внешние фасады которых только что отреставрированы [www.rcrc.gov.sa]



Рис. 11. Строительные работы в реализации проекта «Ворота Дирии»

Методы исследования являются традиционными: анализ эволюции формирования архитектурно-пространственной структуры исторических кварталов Дирии, типологические и морфологические исследования архитектурных объектов в исторических кварталах, визуальный анализ и фотофиксации, выявление предпосылок, обеспечивающих будущую реализацию поставленных задач. Особое внимание уделено методу системного картирования историко-архитектурного потенциала, позволяющему интегрировать данные натурных обследований (фотофиксация, обмеры) в цифровую модель регенерации среды. Данный подход базируется на синтезе традиционного морфологического анализа и современных принципов когнитивного моделирования городских пространств, что позволяет верифицировать проектные решения на предмет их соответствия критериям аутентичности ЮНЕСКО.

Анализ эволюции формирования планировочной структуры мегаполиса показал его невероятно быстрый рост и развитие. Город Эр-Рияд (множественное число от “*rawdha*” – оазис) был основан на руинах нескольких общин примерно в 1740 году. Хотя он был выбран столицей второго саудовского государства в 1824 году, он получил известность только после того, как его независимый губернатор Абдулазиз Аль-Сауд начал кампанию по консолидации современной Саудовской Аравии в 1902 году (Facey, 1992) [4]. Скорость и масштаб преобразований Эр-Рияда с тех пор, особенно в 1970-е годы, не имеют параллелей. Из города-крепости площадью менее 1 квадратного километра в 1920 году он превратился в обширную современную столицу площадью 1500 квадратных километров. Его население увеличилось с примерно 14000 человек в 1902 году до 666480 в 1974 году, до более чем 2,8 миллиона в 1992 году, до более чем 4,8 миллиона к 2004 году, до 5,25 миллиона к 2010 году (Doxiadis [5], 1968; GafS, 1992, 2004, 2010) и до более 6,5 миллиона человек в 2016 году (ADA, 2016). В статье кратко прослеживается городское и физическое развитие Эр-Рияда за последние пятьдесят лет [6]. Процесс разделен на шесть этапов, которые совпадают с физическим развитием города. **Первый этап** начинается с постройки королем Абдель Азизом комплекса Аль-Мурабба за пределами старого города. **Второй этап** охватывает период с начала 1950-х до конца 1960-х годов, когда в городе была представлена современная архитектура. **Третий этап** начинается с инициирования генерального плана командой знаменитого урбаниста Константиноса Доксиадиса, автора концепции мирового города Экуменополиса, в конце 1960-х годов [5].

Четвертый этап начинается с нефтяного бума середины 1970-х годов и SCET Int. – обновление генерального плана города. **Пятый этап** начинается с создания Управления развития Арриаяда (ADA) и его роли в управлении городским ростом с середины 1970-х годов. **Заключительный этап** наступает в конце 1990-х годов, когда ADA приступила к реализации проекта MEDSTAR и его обновлений, а также инициировала проект Общественного сообщества Эр-Рияда (рис. 1 цв. вклейки). На карте красным цветом показано местоположение исторического района Дирия в структуре современного генерального плана столичного города Эр-Рияда, где реализуются некоторые из 10 уникальных проектов КСА. Смена этапов демонстрирует эволюцию отношения к наследию: от игнорирования традиционных структур в период модернизма 1950–70-х гг. к осознанному поиску национальной идентичности в рамках проекта MEDSTAR. Исторический район Дирия в этой системе координат становится не просто

окраиной, а смысловым центром, транслирующим генетический код архитектуры Неджди в ткань современного мегаполиса (рис. 2 цв. вклейки). Конечная цель проекта «Ворота Дирии» – продвижение культурного туризма, стимулирование местной экономики и демонстрация богатого наследия Саудовской Аравии местным и международным гостям.

В декабре 2023 года в Королевстве друг за другом прошли два важных события: 45-я сессия Комитета всемирного наследия ЮНЕСКО в Эр-Рияде и Всемирный археологический саммит в Аль-Уле. Эти международные форумы состоялись на фоне повышенного внимания к вопросам культурного наследия внутри страны, подкрепленного, в том числе, щедрыми инвестициями. Речь идет о кардинальной смене образа и улучшении репутации Саудовской Аравии. Королевство стало вторым по значимости спонсором «Алиф» – базирующегося в Женеве Международного альянса по защите наследия в зонах конфликтов; эта организация открывает в Эр-Рияде свое представительство. Министерство культуры Саудовской Аравии учредило комиссию по делам культурного наследия, в задачи которой входят защита и изучение исторически значимых мест в стране. Совсем недавно на саммит в Аль-Уле, крошечном древнем городе-оазисе, затерянном в восточных пустынях королевства, собралось около 300 ведущих археологов со всего мира. «За последние три года в подходе властей ко всему, что касается культурного наследия, произошел значительный сдвиг», – говорит алжирский археолог Мунир Бушенаки [1].

Стратегия развития. Королевская комиссия города Эр-Рияд разработала стратегию развития исторической Дирии, которая включала следующие мероприятия исследования, проектирования и реализации [1]:

- преобразование археологических и исторических территорий в Дирии в крупный культурный и цивилизационный центр на национальном уровне, учитывая новаторскую и культурную роль Дирии как отправной точки для пропаганды и ядра саудовского государства;

- использование исторических и древних кварталов Дирии в качестве ядра и оси городского и культурного развития [1];

- достижение устойчивого развития за счет сохранения природных компонентов окружающей среды;

- привлечение частных инвестиций к участию в программе развития.

Цели развития: сохранение городской структуры археологических и исторических объектов и повторное использование их для различных мероприятий; обеспечение элементов культурного, социального и экономического развития региона; поощрение местных ремесел и промышленности и развитие традиционных строительных технологий; создание культурного и развлекательного центра; поощрение туризма как инвестиционной сферы и фактора обмена знаниями и культурой; разработка регламентов адаптивного использования (*adaptive reuse*) памятников архитектуры (рис. 3, 4 цв. вклейки), обеспечивающих их функциональную жизнеспособность без искажения исторического облика и конструктивной схемы (саман, дерево тамариск).

2. Результаты исследования и их анализ

Комплексный анализ реализации проекта «Ворота Дирии» позволил классифицировать объекты историко-архитектурной среды по их

функциональному назначению и методам регенерации, разделив их на зоны строгой научной реставрации и зоны адаптивного использования.

Архитектурно-типологический анализ стиля Неджди

Традиционная архитектура центрального региона Саудовской Аравии (Неджд) представляет собой уникальную систему, адаптированную к экстремальному пустынному климату. В ходе исследования авторами систематизированы ключевые морфологические признаки стиля, определяющие идентичность Дирии:

Тектоника и материалы: использование саманного (сырцового) кирпича охристого цвета позволило формировать массивные ограждающие конструкции с высокой тепловой инерцией, защищающие внутренние пространства от перегрева.

Планировочная структура: доминирование малоэтажной плотной застройки с интровертной организацией жилых ячеек. Центральным элементом выступает внутренний двор (патио), выполняющий функции естественного светового колодца и климатического регулятора.

Функционально-декоративные элементы: визитной карточкой стиля являются «шурфат» (зубчатые завершения парапетов) и «фуржат» (треугольные или прямоугольные проемы), обеспечивающие естественную сквозную вентиляцию подкровельных пространств (рис. 4, 5 цв. вклейки).

Методы регенерации исторической среды: реставрация и адаптация

Анализ проектных решений позволил выделить три основных уровня реставрационного вмешательства:

Научная реставрация и музеефикация (Район Аль-Тураиф):

Являясь объектом Всемирного наследия ЮНЕСКО, Аль-Тураиф выступает ядром исторической памяти (рис. 6–8 цв. вклейки). Здесь применяется метод интегративной реставрации, где архитектурные свидетельства прошлого объединяются с природным ландшафтом долины Вади-Ханифа. Центральный объект – Дворец Салва – превращен в научно-образовательный центр, где аутентичные руины интегрированы в современное музейное пространство. Аналогичный подход реализован в Музее общественной жизни, Музее арабской лошади и Военном музее, где исторические глинобитные структуры стали «контейнерами» для мультимедийных экспозиций.

Адаптивная регенерация (Район Аль-Буджаири):

Этот район регенерируется как «культурные ворота» в Дирию. Методология развития территории предполагает формирование функционального интерфейса между современным мегаполисом и историческим ядром. Здесь принципы историзма сочетаются с внедрением новых типологических элементов: Королевского института традиционных искусств, Культурного фонда шейха Мохаммеда бин Абдель Ваххаба и современных мечетей. Примечательно, что теоретический фундамент этого подхода был заложен еще в 1970-е годы в нереализованном проекте выдающегося архитектора Хасана Фатхи. Современный мост шейха Мухаммада бин Абдула Ваххаба (рис. 9 цв. вклейки) выступает композиционной осью, обеспечивающей панорамное раскрытие ансамбля Аль-Тураиф без визуального диссонанса с охраняемой средой.

Социально-пространственная ревитализация (Опыт Аддохо):

Типологический анализ аналогов (деревня Аддохо в Эр-Рияде) подтверждает эффективность модели «живого музея», где воссозданная традиционная

морфология (рыночные площади «сук», мечети, жилые единицы) возвращает исторической застройке ее социальную роль и стимулирует культурный туризм.

Теоретические предпосылки развития архитектурно-исторической среды

Опираясь на анализ проекта «Ворота Дирии», авторами выделены следующие предпосылки развития среды как целостного образно-смыслового пространства:

Архитектурно-пространственные: заключаются в непрерывности морфологической традиции Неджди, объекты которой (возрастом 200–300 лет) сохраняются как эталоны национальной идентичности.

Социально-культурные: выражены в переходе от точечной охраны памятников к средовому подходу, превращающему закрытые исторические зоны в общедоступные образовательные и рекреационные кластеры.

Композиционно-пространственные: базируются на авторской формуле «руина – реставрация – реконструкция – новое». Данная модель позволяет сохранять живописную аутентичность среды, дополняя ансамбли объектами адаптивной современной архитектуры без потери их масштабности и тектонического единства (рис. 10 цв. вклейки).

Конструктивно-технологические: связаны с инновационной реновацией технологий строительства из сырцового кирпича, адаптирующих традиционный материал к современным требованиям безопасности и долговечности.

Таким образом, эволюция формирования архитектурного образа Дирии демонстрирует переход от механического восстановления зданий к созданию устойчивой когнитивно-адаптивной системы, где историческое наследие становится драйвером развития современного общества. Это подтверждается текущими строительными работами по реализации проекта (рис. 11 цв. вклейки), где научная реставрация интегрирована в глобальный контекст «Видения 2030».

Выводы

Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что на текущем этапе в Дирии сформирована надежная нормативно-правовая база: разработаны историко-архитектурные опорные планы и проекты объединенных зон охраны, четко зафиксировавшие границы памятников Аль-Тураиф и Дирия. Однако процесс интеграции наследия в структуру современного мегаполиса выявил ряд нерешенных теоретических и практических задач:

Перспективы изучения жилой среды. Выявлена необходимость углубленного морфологического исследования жилых кварталов района Буджаири и прилегающих территорий Дирии. Их сохранение требует разработки методики адаптивной регенерации, которая позволит внедрить современные инженерные технологии, не нарушая тектоническую целостность традиционной саманной застройки.

Междисциплинарный подход. Обоснована необходимость проведения комплексных социологических исследований. Это позволит научно определить зоны регулирования застройки и оптимальные сценарии размещения объектов историко-культурного туризма, обеспечивая баланс между запросами общества и требованиями сохранения аутентичности.

Теоретическая лакуна. Ключевой научной проблемой остается отсутствие нормативных правил формирования буферных (буферно-контактных) зон. В условиях жесткого соприкосновения исторической ткани и современной застройки Эр-Рияда, разработка таких регламентов является критически важной



для предотвращения визуальной и пространственной изоляции памятников ЮНЕСКО.

Таким образом, переход от точечной реставрации объектов к системному управлению культурным ландшафтом Дирии требует создания новых теоретических моделей, способных обеспечить гармоничное сосуществование «генетического кода» прошлого и инновационного развития будущего.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Saudi Vision : официальный сайт. – URL: <https://www.vision2030.gov.sa> (дата обращения: 11.01.2024). – Текст : электронный.
2. Законодательство Королевства Саудовская Аравия : официальный сайт. – URL: <https://laws.boe.gov.sa> (дата обращения: 20.03.2024). – Текст : электронный.
3. Филлали, А. Градостроительный подход к сохранению и развитию архитектурно-исторической среды крупнейшего города в условиях функционирования общественного центра современного мегаполиса (на примере Эр-Рияда) / А. Филлали, Е. А. Ахмедова // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Архитектура и градостроительство : сборник статей 81-й Всероссийской научно-технической конференции / Самарский государственный технический университет. – Самара, 2024. – С. 283–296.
4. Facey, W. Riyadh: The Old City / W. Facey. – London : Immel, 1992. – 384 p.
5. Doxiadis. Riyadh Master Plan / Doxiadis. – 1971. – No. A-19.
6. Al-Hathloul, S. Riyadh Development Plans in the Past Fifty Years (1967–2016) / S. Al-Hathloul // Current Urban Studies. – 2017. – Vol. 5. – P. 97–120.
7. Saudi Arabia's At-Turaif UNESCO World Heritage Site opens to the world / WTM Team. – 2021. – URL: <https://www.wtm.com> (дата обращения: 25.03.2024). – Текст : электронный.
8. Al-Harbi, M. Al-Bujairi, The Gate of Time and Witness of Modern Saudi History / M. Al-Harbi. – 2015.
9. Mustafa. Al-Bujairi neighborhood in historic Diriyah / Mustafa. – 2022. – URL: <https://www.almrsal.com> (дата обращения: 25.03.2024). – Текст : электронный.
10. Historic At-Turaif District Diriyah. – 2019. – URL: <https://islamicarchitecturalheritage.com> (дата обращения: 25.03.2024). – Текст : электронный.
11. Workman, A. Inside Saudi Arabia's Unesco-listed At-Turaif / A. Workman. – 2019. – URL: <https://www.thenationalnews.com> (дата обращения: 25.03.2024). – Текст : электронный.
12. Diriyah Historical Development Programme : официальный сайт. – URL: <https://www.rsrc.gov.sa> (дата обращения: 25.03.2024). – Текст : электронный.
13. Sheikh Muhammad bin Abdul Wahhab Bridge : официальный сайт. – URL: <https://www.al-jazirah.com> (дата обращения: 25.03.2024). – Текст : электронный.
14. Diriyah Gate Development Authority : официальный сайт. – URL: <https://www.dgda.gov.sa/> (дата обращения: 25.03.2024). – Текст : электронный.
15. SkyscraperCity : онлайн-форум. – URL: <https://www.skyscrapercity.com> (дата обращения: 25.03.2024). – Текст : электронный.



FILLALI Abderraouf, postgraduate student of the chair of urban planning;
AKHMEDOVA Elena Aleksandrovna, academician of RAACS, doctor of architecture, professor of the chair of urban planning; **ADONINA Anna Vladimirovna**, candidate of architecture, associate professor of the chair of urban planning

**THEORETICAL AND METHODOLOGICAL FOUNDATIONS AND
INTEGRATED ARCHITECTURAL AND SPATIAL ASSESSMENT FOR THE
CONSERVATION AND DEVELOPMENT OF THE HISTORICAL
ARCHITECTURAL ENVIRONMENT IN RIYADH**

Samara State Technical University.

244, Molodogvardeyskaya St., 443100, Samara, Russia.

Tel.: (846) 339-14-05; fax: (846) 278-44-00; e-mail: dir_inst_arch@bk.ru

Key words: traditional Najdi architecture, regeneration of the architectural and historical environment, scientific restoration and museification, adaptive reuse of heritage, historical district of Diriyah.

This article proposes a unique methodology for a comprehensive architectural and spatial assessment of the preservation and development of the architectural environment of Riyadh's historic neighborhoods, using the historic district of Diriyah and its key areas, At-Turaif and Burjairi, as a case study. The authors analyze the architectural and spatial, functional and economic, socio-cultural, and compositional and spatial prerequisites for the development of Diriyah's architectural and historical environment as a holistic, figurative and semantic space. Plans for the initial stages of implementing the architectural and spatial transformation concept are briefly outlined.

REFERENCES

1. Saudi Vision: official website. URL: <https://www.vision2030.gov.sa> (accessed: 11.01.2024).
2. KSA Legislation: official website. URL: <https://laws.boe.gov.sa> (accessed: 20.03.2024).
3. Fillali A., Akhmedova E.A. Gradostroitelny podkhod k sokhraneniyu i razvitiyu arkhitekturno-istoricheskoy sredy krupneyshego goroda v usloviyakh funktsionirovaniya obshchestvennogo tsentra sovremennogo megapolisa (na primere Er-Riyada) [Urban planning approach to the preservation and development of the architectural and historical environment of the largest city in the context of the functioning of the public center of a modern metropolis (on the example of Riyadh)]. Traditsii i innovatsii v stroitelstve i arkhitekture. Arkhitektura i gradostroitelstvo [Traditions and innovations in construction and architecture. Architecture and urban planning]: sbornik statey 81-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Samara, SamGTU, 2024, P. 283–296.
4. Facey W. Riyadh: The Old City. London, Immel, 1992, 384 p.
5. Doxiadis. Riyadh Master Plan, No. A-19. 1971.
6. Al-Hathloul S. Riyadh Development Plans in the Past Fifty Years (1967–2016). Current Urban Studies, 2017, Vol. 5, P. 97–120.
7. Saudi Arabia's At-Turaif UNESCO World Heritage Site opens to the world. WTM Team, 2021. URL: <https://www.wtm.com> (accessed: 25.03.2024).
8. Al-Harbi M. Al-Bujairi, The Gate of Time and Witness of Modern Saudi History. 2015.
9. Mustafa. Al-Bujairi neighborhood in historic Diriyah. Almrsal, 2022. URL: <https://www.almrsal.com> (accessed: 25.03.2024).



10. Historic At-Turaif District Diriyah. 2019. URL: <https://islamicarchitecturalheritage.com> (accessed: 25.03.2024).
11. Workman A. Inside Saudi Arabia's Unesco-listed At-Turaif. 2019. URL: <https://www.thenationalnews.com> (accessed: 25.03.2024).
12. Diriyah Historical Development Programme: official website. URL: <https://www.rcrc.gov.sa> (accessed: 25.03.2024).
13. Sheikh Muhammad bin Abdul Wahhab Bridge: official website. URL: <https://www.al-jazirah.com> (accessed: 25.03.2024).
14. Diriyah Gate Development Authority: official website. URL: <https://www.dgda.gov.sa/> (accessed: 25.03.2024).
15. SkyscraperCity: online forum. URL: <https://www.skyscrapercity.com> (accessed: 25.03.2024).

© А. Филлали, Е. А. Ахмедова, А. В. Адонина, 2026

Получено: 04.04.2026 г.



УДК 726.03+72.01(470.341)

С. М. ШУМИЛКИН, д-р архитектуры, проф., зав. кафедрой истории архитектуры и основ архитектурного проектирования; **Д. В. БАРИНОВ**, аспирант кафедры истории архитектуры и основ архитектурного проектирования

ОБЪЕМНО-ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КОМПОЗИЦИИ ХРАМОВ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ КОНЦА XVIII – ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЫ XIX ВЕКОВ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (909) 295-06-82; эл. почта: dm.archirest@gmail.com

Ключевые слова: храмовая архитектура, объемные композиции храмов, эпоха классицизма.

В работе выявляются и анализируются храмы Нижегородской области конца XVIII – первой половины XIX веков. Впервые проводится классификация типов объемно-пространственных композиций существующих храмов с применением традиционных методов историко-архитектурного анализа. В результате для Нижегородской области выявлены две линии развития объемно-пространственных композиций храмов: «традиционная», восходящая к барочным тенденциям XVIII века, и «новационная», отражающая трансляцию столичных композиционных типов эпохи классицизма в провинциальное зодчество.

Введение

Сохранение историко-культурного наследия России является одной из приоритетных задач устойчивого развития страны в ближайшие десятилетия, поэтому поиск, изучение и анализ региональной храмовой архитектуры становится важной задачей в формировании образа идентичности Нижегородской области. Храмовое наследие конца XVIII – первой половины XIX веков является самым сохранившимся пластом, исходя из анализа памятников, поставленных на государственную охрану. При этом обнаруживается отсутствие историографических трудов, обобщающих и разбирающих этот период. В данной работе предпринимается попытка выявить и классифицировать разнообразие типов объемно-пространственных композиций существующих храмов.

Цель и методы

В работе применены традиционные методы историко-архитектурных исследований, которые включают комплексный метод, включающий стилистический, композиционный, морфологический и типологический. функционально-планировочный, конструктивный анализы объектов, а также архивные, литературные и натурные исследования. Полученные данные были обобщены с помощью исторического и сравнительного анализа.

Классификация объемно-пространственных композиций во многом основывается на методике В. И. Плужникова, который является одним из основателей методов исследования памятников культовой архитектуры России [1, 2]. Советский и русский исследователь заложил принципы

типологической классификации храмов, активно используемой в современной каталогизации объектов культурного наследия, в том числе в создании Свода памятников архитектуры и монументального искусства различных областей Российской Федерации.

Исследование также базируется на обращении к отечественным трудам по истории и теории архитектуры классицизма [3], которые помогают раскрыть архитектурный контекст и парадигму эволюции неоднородных процессов смены исторических стилей [4].

Для Нижегородской области характерно существование двух линий развития объемно-пространственных композиций храмовых зданий, одна из них, которую мы условно назовем «традиционной» (рис. 1), является частью барочных тенденций в архитектуре, существующих на всем протяжении XVIII века и не угасающих в первой половине XIX века, и линия «новационная» (рис. 2), которая выражается в трансляции новых типов композиций из столичной архитектуры в провинцию и способствует развитию нового стиля – классицизм.

Традиционные типы объемно-пространственных композиций храмов Нижегородской области



Рис. 1. Типы объемно-пространственного построения композиций храмовых зданий:
1 – четырехстолпный четверик, 2 – бесстолпный четверик с сомкнутым сводом,
3 – «восьмерик на четверике», 4 – восьмерик на четверике с объемным декором

Традиционные типы в объемно-пространственных композициях храмовых зданий конца XVIII – первой половины XIX веков свидетельствуют об инертности провинциальной архитектуры относительно столичной, что в некоторой степени обуславливается удаленностью от центров и отсутствием профессионального архитектора вплоть до XIX века, с другой стороны мы можем констатировать, что в данном случае традиционные типы включены в общую эволюцию развития типологии культовой архитектуры, которая зачастую не теряет связь с устоявшимися древнерусскими типами объемно-пространственного

построения сооружений, потому что барокко XVIII века активно пользовалось традициями, и они не угасали, а приспосабливались со временем [5]. Изучим эти тенденции на типах композиций.

– *Четырехстолпный четверик* со световыми барабанами – пример архаичной композиции, восходящей к древнерусскому типу пятиглавого соборного храма. В церкви Рождества Богородицы (1807–1823 гг.) в с. Катунки, Чкаловского г.о. (рис. 1.1) можно отметить классицистический характер декоративного убранства фасадов, выраженный в симметричной композиции в четыре световые оси с выступающими четырехколонными портиками в первом уровне. Стоит отметить, при устремленности на плоский декор, зодчим удается создать тонкую пластику пилястр композитного ордера фасадов [6].

– *Бесстолпный четверик, перекрытый сомкнутым сводом*, относится к традиционным типам построения композиции, тоже тяготеющий к добарочным традициям, проявляющимся активно в Нижегородской области в первой половине XVIII века. Данный тип определяется четырехлепестковым сводом, перекрывающим четверик, преимущественно высоким, на котором может быть устроен небольшой световой или закрытый барабан. Хорошим примером может являться храм Покрова Пресвятой Богородицы (прибл. 1821 г.) в с. Белбаз, Ковернинского района, где кубический объем основного храма завершается сомкнутым сводом с небольшим световым барабаном и луковичной главкой, структура фасадов повторяет барочные ярусные построения, но имеет классицистические прямые сандрики (рис. 1.2).

– *«Восьмерик на четверике»* является наиболее устойчивым традиционным типом построения композиции, сформированный вариациями по пропорциям компоновками форм восьмерика на четверике. Строгим примером может служить храм Вознесения Господня (1815 г.) в с. Степаново, Арзамасского района, где главный объем храма строится по типу «восьмерик на четверике», но при детальном рассмотрении можно обнаружить плоский классицизирующий декор на фасадах (рис. 1.3), симметричное построение северного и южного фасадов с использованием плоского четырехпилястрового портика с треугольным фронтоном.

Данный тип активно приспособляется в период классицизма и с помощью объемного декора, о чем свидетельствует храм Воскресения Словущего (1825 г.) в с. Гридино, Перевозского района. Ампирное декоративное убранство с объемными ордерными портиками размещено на фасадах церкви с линейным трехчастным планом, вместе с использованием традиционной композиции храма восьмерик на четверике (рис. 1.4).

Выявленная линия выражает переходный характер типологий от барокко к классицизму. Они показывают прочность традиционного начала в культовой архитектуре, которое через синтез традиционного и новейшего служит основанием для проявления регионального своеобразия памятников архитектуры.

Новационные типы объемно-пространственных композиций храмов Нижегородской области

Формирование «новационной» линии типологии объемно-пространственных композиций храмовой архитектуры связано с зарождением на территории Нижегородской области стиля классицизм. Развитие и закрепление нового стиля в провинции происходит через утверждение новых типов композиций [7], причем характерно для Нижегородской области, что появления новых типов не имеют

существенной разницы во времени и обнаруживаются на рубеже XVIII и XIX веков.

НОВАЦИОННЫЕ КЛАССИЦИСТИЧЕСКИЕ ТИПЫ КОМПОЗИЦИЙ



Рис. 2. Типы объемно-пространственных композиций храмовых зданий: 1 – ротонда на четверике, 2 – пятикупольный храм ротонда на четверике, 3 – четверик с низким купольным сводом, 4 – ротондальный

– *Ротонда на четверике* служит самым распространенным типом объемно-пространственного построения храмов на территории Нижегородской области конца XVIII – первой половины XIX веков. Данный тип является ярким маркером стиля классицизм и формируется установкой на четверике цилиндрического барабана-ротонды, перекрытого куполом. Иллюстрирующим этот тип примером может служить храм Преображения Господня (1835 г.) в с. Вершилово, Чкаловского района (рис. 2.1), где основной объем образован ротондой на четверике, но стоит отметить: в этом примере проявляется тенденция к возвращению традиционных приемов, как пятиглавие, полученное за счет выступов в барабане барочного очертания.

Вариацией типа является центрический крестово-купольный храм, один из ярких примеров выражения философии Просвещения и связи русской архитектуры с западной европейской культурой [8]. Для Нижегородской области иконографическим примером служит Спасский Староярмарочный собор (1818–1822 гг.) в Нижнем Новгороде, построенный по проекту О. Монферрана. Храм по форме греческого креста, центрический, пятиглавый и с чистым ордерным построением выступающих четырехколонных портиков и венчающей центральной ротонды (рис. 2.2). Храм становится образцом для подражания в местной провинциальной архитектуре, как пример чистого классицизма.

– *Кубический объем с низким куполом* является в большей степени фрагментарным на территории Нижегородской области типом построения храма, в нем четверик покрывается куполом или восьмилепестковым сводом без ротонды или восьмерика. Такие композиции обладают монументальными приземистыми пропорциями и являются продолжением развития бесстолпных

храмов. Такое построение можно усмотреть в храме Троицы (1814 г.) в г. Горбатов, Павловского района (рис. 2.3), где кубический четверик покрывается пологим сводом с пятью барабанами с луковичными главками [9].

– *Ротонда* – редкий пример использования формы вращения в основном объеме храма. Это уникальные памятники храмовой архитектуры, тяготеющие к западноевропейским аналогам [10, 11]. На территории области автором было найдено несколько вариантов объемно-пространственных композиций: чистая ротонда, линейная ротонда с двухколоколенной папертью, трехчастная ротонда с трапезной и колокольной, линейно-симметричная ротонда. Характерной является ротонда Скорбященского храма (1829 г.), построенного в г. Ардатов. Симметричная центрическая композиция, образованная выступами крестообразного объема из ротонды, дополнялась двухъярусной колокольной (рис. 2.4).

Стоит отметить разнообразие композиций по форме завершений: перечисленные типы могут разделять на храмы *одноглавые*, как, к примеру, Храм Воскресения Словущего (1826 г.) в с. Юрьево, Гагинского района – центрический крестовокупольный собор с барабаном-ротондой, завершающийся деревянным куполом; и *пятиглавые* (с постановкой по углам или по сторонам света), как церковь Трех Святителей (1829 г.) в г. Урень. К пятиглавию тяготеют в основном знаковые сооружения, имеющие активную градостроительную роль в окружающем пространстве.

Все типы могут дополняться трапезной и колокольной, которые можно условно разделить на церкви с *пристроенной колокольной*, как храм Успения Пресвятой Богородицы в с. Новоуспенское (1826 г.), где пятиглавый объем молеального зала в композиции восьмерик на четверике дополняется развитой трапезной и четырехъярусной колокольной, и *отдельно стоящей колокольной*, как в композиции церкви Смоленской иконы Божией Матери (прибл. 1815 г.) в п. Выездное.

Заключение

В статье был проведен комплексный анализ объемно-пространственных композиций храмов Нижегородской области конца XVIII – первой половины XIX вв. и были выявлены традиционные и новационные типы. Среди традиционных типов зафиксированы следующие: четырехстолпный четверик, четверик со сводом, восьмерик на четверике, а новационных: ротонда, ротонда на четверике, четверик с низким куполом. Несмотря на архаичность барочных пространственных решений, традиционные композиции демонстрируют высокую устойчивость и успешно адаптируются через классицистический декор, сохраняя популярность вплоть до 1830-х гг., а новационные содержат барочные детали, выстраиваясь в общую систему эволюции объемно-пространственных композиций храмовой архитектуры Нижегородской области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Плужников, В. И. Объемные композиции культовых построек Орловской области / В. И. Плужников // Памятники русской архитектуры и монументального искусства. – Москва, 1980. – С. 182–214.
2. Плужников, В. И. Соотношение объемных форм в русском культовом зодчестве начала XVIII в. / В. И. Плужников // Русское искусство первой четверти XVIII века : материалы и исследования / под редакцией Т. В. Алексеевой. – Москва : Наука, 1974. – С. 81–108. – EDN ZCXQOJ.



3. Евсина, Н. А. Архитектурная теория в России второй половины XVIII – начала XIX века / Н. А. Евсина ; Всесоюзный институт искусствознания. – Москва : Наука, 1985. – 254 с.
4. Прошлое и будущее классической архитектуры / Д. О. Швидковский, Г. В. Есаулов, Д. А. Карелин, Ю. Е. Ревзина. – Москва : Архитектура-С, 2017. – 527 с. – (УГМК - книги по искусству и архитектуре). – ISBN 978-5-9647-0304-4. – EDN PYUVLK.
5. Крашенинников, А. Ф. Некоторые особенности переломного периода между барокко и классицизмом в русской архитектуре / А. Ф. Крашенинников // Русское искусство XVIII в. – Москва : Наука, 1973. – С. 66–75.
6. Коваль, В. В. Храмы села Катунки / В. В. Коваль. – Нижний Новгород : Некоммерческая организация «Фонд Возрождения Собора Рождества Пресвятой Богородицы в п. Катунки», 2006. – 96 с.
7. Путятин, И. Е. Русская церковная архитектура эпохи классицизма идеи и образы : специальность 17.00.04 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора искусствоведения / Путятин Илья Евгеньевич. – Москва, 2011. – 60 с.
8. Чекмарев, А. В. Влияние «царскосельской Софии» на архитектуру усадебных церквей / А. В. Чекмарев // Русская усадьба. Сборник Общества изучения русской усадьбы / научный редактор-составитель М. В. Нащокина. – 2013. – Вып. 18 (34). – Санкт-Петербург : Коло, 2013. – С. 312–329.
9. Павловский район : иллюстрированный каталог памятников истории и культуры / Правительство Нижегородской области, Управление государственной охраны объектов культурного наследия Нижегородской области ; ответственный редактор А. В. Лисицына. – Нижний Новгород : Кварц, 2015. – 560 с. – ISBN 978-5-906698-34-6.
10. Яковлев, А. Н. Антикизирующие церкви-ротонды эпохи классицизма. Часть первая / Н. А. Яковлев // Архитектурное наследие. – 2020. – Вып. 73. – Санкт-Петербург : Коло, 2020. – С. 99–122.
11. Терешина, О. Б. Типологическое многообразие ротондальных храмов России XVIII – XIX веков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 76–80. – EDN PWAUOE.

SHUMILKIN Sergey Mikhailovich, doctor of architecture, professor of the chair of history of architecture and fundamentals of architectural design;
BARINOV Dmitriy Vladimirovich, postgraduate student of the chair of-history of architecture and fundamentals of architectural design

VOLUMETRIC AND SPATIAL COMPOSITIONS OF CHURCHES IN THE NIZHNY NOVGOROD REGION IN THE LATE 18th AND THE FIRST HALF OF THE 19th CENTURIES

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (909) 295-06-82; e-mail: dm.archirest@gmail.com

Key words: church architecture, volumetric compositions of churches, the era of classicism.

The paper identifies and analyzes the churches of the Nizhny Novgorod region from the late 18th to the first half of the 19th centuries. For the first time, a classification of the types of spatial compositions of the existing churches is carried out using traditional methods of historical and architectural analysis. As a result, two lines of development of the spatial compositions of churches are identified for the Nizhny Novgorod region: the 'traditional' line, which traces back to the Baroque tendencies of the 18th century, and the 'innovative' line, which reflects the transmission of the capital's compositional types of the Classical era into provincial architecture.

REFERENCES

1. Pluzhnikov V. I. Obemnye kompozitsii kultovykh postroek Orlovskoy oblasti [Volumetric compositions of cult buildings in the Oryol region]. Pamyatniki russkoy arkhitektury i monumentalnogo iskusstva [Monuments of Russian Architecture and Monumental Art]. Moscow, 1980, P. 182–214.
2. Pluzhnikov V. I. Sootnoshenie obemnykh form v russkom kultovom zodchestve nachala XVIII v. [The ratio of volumetric forms in Russian cult architecture of the early 18th century]. Russkoe iskusstvo pervoy chetverti XVIII veka [Russian art of the first quarter of the 18th century]: materialy i issledovaniya. pod redaktsiey T. V. Alekseevoy. Moscow, Nauka, 1974, P. 81–108.
3. Evsina N. A. Arkhitekturnaya teoriya v Rossii vtoroy poloviny XVIII – nachala XIX veka [Architectural theory in Russia in the second half of the 18th – early 19th centuries]. Moscow, Nauka, 1985, 254 p.
4. Shvidkovskiy D. O., Esaulov G. V., Karelin D. A., Revzina Yu. E. Proshloe i budushchee klassicheskoy arkhitektury [Past and future of classical architecture]. Moscow, Arkhitektura-S, 2017, 527 p. (UGMK – knigi po iskusstvu i arkhitekture).
5. Krashenninikov A. F. Nekotoryye osobennosti perelomnogo perioda mezhdru barokko i klassitsizmom v russkoy arkhitekture [Some features of the transitional period between Baroque and Classicism in Russian architecture]. Russkoe iskusstvo XVIII v. [Russian art of the 18th century]. Moscow, Nauka, 1973, P. 66–75.
6. Koval V. V. Khramy sela Katunki [Churches of the village of Katunki]. Nizhny Novgorod, Nekommercheskaya organizatsiya "Fond Vozrozhdeniya Sobora Rozhdestva Presvyatoy Bogoroditsy v p. Katunki". 2006, 96 p.
7. Putyatin I. E. Russkaya tserkovnaya arkhitektura epokhi klassitsizma idei i obrazy [Russian church architecture of the Classicism era: ideas and images]: spetsialnost 17.00.04: avtoref. diss. ... dok. iskusstvovedeniya. Moscow, 2011, 60 p.
8. Chekmarev A. V. Vliyanie "tsarskoselskoy Sofii" na arkhitekturu usadbenykh tserkvey [The influence of the "Tsarskoye Selo Sophia" on the architecture of estate churches]. Russkaya usadba. Sbornik Obshchestva izucheniya russkoy usadby [Russian Estate. Collection of the Society for the Study of the Russian Estate]. nauchnyy redaktor-sostavitel M. V. Nashchokinoy. Saint Petersburg, Kolo, 2013, № 18 (34), P. 312–329.
9. Pavlovskiy rayon: illyustrirovanniy katalog pamyatnikov istorii i kultury [Pavlovsky district: illustrated catalog of historical and cultural monuments]. Pravitelstvo Nizhegorodskoy oblasti, Upravlenie gosudarstvennoy okhrany obektov kulturnogo naslediya Nizhegorodskoy oblasti; otvetstvennyy redaktor A. V. Lisitsyna. Nizhny Novgorod, Kvarts, 2015, 560 p.
10. Yakovlev A. N. Antikiziruyushchie tserkvi-rotundy epokhi klassitsizma [Antique-inspired rotunda churches of the Classicism era]. Chast I. Arkhitekturnoe nasledstvo [Architectural Heritage]. Saint Petersburg, Kolo, 2020, № 73, P. 99–122.
11. Tereshina O. B. Tipologicheskoe mnogoobrazie rotondalnykh khramov Rossii XVIII – XIX vekov [Typological diversity of rotunda churches in Russia in the 18th – 19th centuries]. Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitelstvo i arkhitektura [Bulletin of SUSU. Series «Construction Engineering and Architecture». 2013, Vol. 13, № 2, P. 76–80.

© С. М. Шумилкин, Д. В. Баринов, 2026

Получено: 13.05.2026 г.



УДК 727.3.05

А. В. СКОПИНЦЕВ, канд архитектуры, проф. кафедры архитектурного и средового проектирования; **И. В. КИТАЕВА**, аспирант кафедры архитектурного и средового проектирования

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ УНИВЕРСИТЕТСКИХ СТАРТАП-СТУДИЙ

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Академия архитектуры и искусств. Россия, 344080, г. Ростов-на-Дону, пр. Буденновский, д. 39.

Тел.: (863) 240-21-78; эл. почта: aai@sfnu.ru

Ключевые слова: стартап-студия, университетские инновационные пространства, архитектурно-пространственные модели стартап-студий, функциональная структура стартап-студий.

В статье рассматривается проблема формирования университетских стартап-студий. Исследуются эффективные практики организации стартап-пространств, демонстрирующие положительную связь между качеством рабочей среды и успехами инновационных бизнес-проектов. Описываются различные модели университетских стартап-студий, выделяются принципы их архитектурно-пространственной организации и функционирования.

Введение

Сегодня развитие инновационных экосистем является приоритетным направлением научно-технической политики многих государств. Университетские стартапы играют важную роль в создании новых продуктов и услуг, коммерциализации научных разработок и подготовки кадров для высокотехнологичных отраслей экономики. В настоящее время в разных странах мира не менее 25 % от общего числа стартапов создаются студентами и профессорами университетов. В России этот показатель не превышает 3 % [1].

Для решения проблемы крайне низкого уровня участия студентов в коммерческом освоении интеллектуальных разработок, созданных в региональных высших учебных заведениях России, было начато формирование интегрированной системы поддержки студенческих технологических инициатив. На данный момент в России создана сеть, включающая в себя 21 студию. В 2025 году планируется расширить сеть еще на 6 новых университетских стартап-студий, а к 2030 году – довести их число до 50 [2].

В рамках федерального проекта «Технологии» прошел конкурс по отбору программ поддержки университетских стартап-студий, осуществляющих реализацию мероприятий университетских программ развития, направленных на создание и поддержку технологических инициатив и бизнес-планов. «Университетские стартап-студии (УСС) – это формат развития технологического предпринимательства, известный как «фабрика стартапов» [3]. Они выступают платформой для превращения идей исследователей в реальные продукты и технологии, привлекая инвестиции, объединяя команды разработчиков и обеспечивая необходимую инфраструктуру для запуска инновационных бизнес-проектов.

Несмотря на очевидную актуальность вопроса, существующие научные работы фокусируются главным образом на изучении бизнес-моделей [1, 2] и экономических аспектов [3–5] функционирования стартапов, упуская из виду значимость физического окружения и архитектурных решений. Между тем, исследования сходных пространств, таких как университетские коворкинги, творческие кластеры и технопарки, показывают прямую зависимость между качеством рабочей среды и эффективностью сотрудников и студентов.

Методология исследования

В качестве методологической базы исследования выступает «*архитектурно-средовой подход*» к формированию университетских стартап-студий, основанный на приоритете функционально-пространственной составляющей, которая определяет эффективность и окупаемость УСС. Организация пространства играет ключевую роль в формировании комфортной и эффективной рабочей среды для инновационной деятельности. Архитектурно-пространственные решения влияют на продуктивность и креативность членов команд, формируя среду, способствующую творческому мышлению и обмену идеями [4]. Именно такая среда особенно важна для стартап-студий, занимающих особое положение в инфраструктуре бизнес-развития вузовской среды.

Этапы создания стартап-студии

Термин «стартап» впервые прозвучал в эпоху становления технологического бума 1970-х годов, когда журнал *Forbes* в августе 1976 года использовал его применительно к небольшим компаниям с большим потенциалом роста [5]. Настоящую известность понятие приобрело лишь спустя два десятилетия, в конце XX – начале XXI веков, когда начался бурный всплеск предпринимательства, и молодые технологические компании (*Microsoft, Apple*) развивались беспрецедентными темпами. В это же время возникает идея формирования «компаний по производству идей», т. е. первая стартап-студия в современном ее понимании – *Idealab* – основанна Биллом Гроссом в Кремниевой долине в 1996 году как технологический инкубатор [6].

С начала 2000-х количество стартап-студий стало активно расти, однако настоящий бум популярности данной бизнес-модели произошел лишь после глобального финансового кризиса 2007 года. И, согласно последним статистическим данным, за десять лет количество действующих стартап-студий увеличилось на 5000 %. [7]. Этот период ознаменовался появлением множества различных форматов стартап-студий, разнообразие которых расширялось пропорционально увеличению их численности.

Особенности моделей университетских стартап-студий

Согласно исследованию сети фабрик стартапов *Global Startup Studio Network (GSSN)*, существует семь видов фабрик стартапов, одним из которых являются *University & Government Studios* – это студии, функционирующие при университетах или правительственных учреждениях [7].

Университетская стартап-студия является важной площадкой для развития инновационных идей студентов и преподавателей, способствуя созданию перспективных коммерческих проектов на основе научных исследований и технологий. Главный недостаток – достаточно узкая отраслевая специализация. Выбор направления для создания продукта у университетских студий ограничен зависимостью от специализации вуза [8]. Среди основных функций университетской стартап-студии (рис. 1) выделяют:

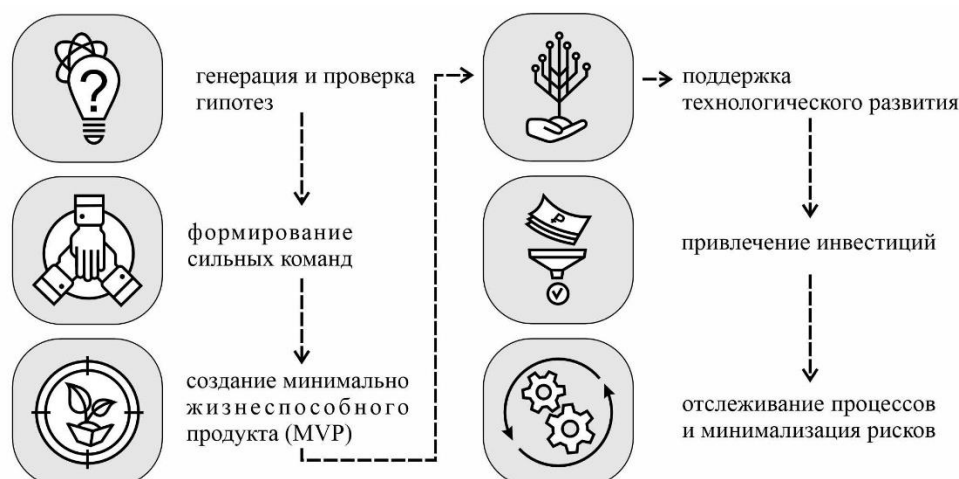


Рис. 1. Структура функциональных этапов в работе стартап-студии

Однако существуют различные вариации успешных моделей университетских стартап-студий (табл.):

Каждая из этих моделей имеет свои преимущества и особенности, однако общим для всех остается стремление создать благоприятную среду для появления и роста инновационных предприятий, основанных на знаниях и технологиях университетов. «Потенциал среды можно представить как поле возможностей для человека, и не только для него» [9].

Хотя сами стартап-студии изначально представляют собой немногочисленную команду специалистов (средняя команда составляет около 12 человек на постоянной основе, еще четыре на свободном графике) [1] и не требуют отдельных значимых площадей, но студия должна обладать пространственным потенциалом, позволяющим успешно организовывать рабочий процесс привлекаемых сторонних команд (различных по количеству), представлений результатов работы, обсуждений проектов и апробаций результатов и т. д. Реальные данные подтверждают такую потребность: так, в Иннополисе из 350 человек, участвовавших в работе стартап-студии, 70 студентов получили грантовую поддержку, а из стен Казанского федерального университета вышло целых 225 победителей программы «Студенческий стартап» всего лишь за пять волн конкурса [3]. Подобные цифры свидетельствуют о высоком уровне вовлечения временных участников, превышающем численность постоянных штатных сотрудников. Несмотря на различные модели стартап-студий, универсальную структуру (рис. 2) можно представить следующим образом:



Рис. 2. Социально-кадровая структура университетских стартап-студий

Опыт формирования стартап-студий

Университетские стартап-студии отличаются по площади, конфигурации, функциональным моделям и архитектурно-пространственной организации. Каждый из этих параметров обусловлен рядом факторов: возраст студии, количество разрабатываемых проектов, численность команды, сфера деятельности, размещение в отдельном здании / интеграция с другими площадками, а также специализированное (*greenfield*) или адаптированное (*brownfield*) пространство.

В качестве примеров стартап-студий при зарубежных вузах можно привести: *Startup Studio Cornell Tech*, Корнелл (Лондон). Особенная сложность в проекте заключалась в совместном размещении студентов и бизнеса в одном здании площадью около 235 тыс. кв. футов, предназначенном для активного взаимодействия студентов, аспирантов и бизнесменов с целью создания стартапов и запуска инновационных предприятий. Одна треть площади предназначена для студентов, ее занимают студии, лаборатории, учебные классы и площадки для мероприятий Корнеллского технологического университета, а верхние этажи отведены под офисы фирм, работающих в сфере технологий. Сформированный в здании обширный атриум создает условия для обменов мнениями, случайных контактов и формирования связей (рис. 3).

Таблица

Модели университетских стартап-студий

| | Разновидности моделей университетских стартап-студий | Особенности функционирования моделей стартап-студий | Учебные заведения с действующей моделью |
|---|--|---|---|
| 1 | технологическая | <ul style="list-style-type: none"> – ориентирована преимущественно на развитие технологических решений; – доступ к лабораториям, оборудованию и научным наставникам; – объединение в проектные группы по личным предпочтениям; – создания прототипов, тестирования и подготовки презентаций для инвесторов | Корнеллский технологический институт |
| 2 | проектно-коммуникационная | <ul style="list-style-type: none"> – направленная как на создание венчурного бизнеса, так и на формирование необходимых связей и контактов; – три блока: разработка и запуск собственного стартапа; индивидуальное наставничество; акселератор; – акселератор: представление проекта инвесторам, формирование связей внутри университета и за его пределами | Иллинойский технологический институт, Московский физико-технический институт (МФТИ) |
| 3 | практико-ориентированная | <ul style="list-style-type: none"> – студенты проводят год вне традиционной аудиторной программы; – выбирают одну из семи должностей в студии; – формируют командный стартап, ориентированный на потребности региона | <i>Stamford Startup Studio</i> при Университете Коннектикута |
| 4 | образовательная | <ul style="list-style-type: none"> – интегрирующая образовательные программы с практической деятельностью; – студент самостоятельно выбирает различные курсы (основы становления основателя, проектирование венчурных проектов), с последующей сдачей в конце семестра; – в конце каждого года – конкурс венчурных проектов на предмет масштабирования; – выпускникам также предоставляют рабочие пространства и требуемые ресурсы сроком на один год | Колумбийский университет; стартап-студия Центра инноваций и сотрудничества, Университет Южной Австралии |
| | | <ul style="list-style-type: none"> – стартап как диплом (один из пунктов программы «Цифровая экономика» в России), к которому он готовится часть или весь период обучения | Университет Иннополис; Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ) |



Рис. 3. Здание Стартап-студии Корнеллского технологического университета
[<https://www.theplan.it/eng/award-2019-Education/tata-innovation-center-at-cornell-tech>]

Texas Innovation Center (Техасский университет, Остин) представляет собой центр площадью 4200 квадратных футов для совместной работы сообщества. Коворкинг (рис. 4) включает: зал для совещаний, видеоконференций и работы, зону открытого рабочего пространства, два конференц-зала. Преподаватели, исследователи и аспиранты могут заранее забронировать места пребывания (помещения вместимостью от 6 до 20 человек). Также есть возможность получения доступа к университетской «Лаборатории инноваций», оснащенной специализированным оборудованием для проработки продукта или прототипа и минимизации рисков.



Рис. 4. Инновационный центр Техасского университета
[<https://www.mckinneyork.com/project/texas-innovation-center/>]
[<https://texasinnovationcenter.utexas.edu/about>]

University of Arkansas – научно-венчурная студия. Главная цель здания заключается в стимулировании эффективной командной работы и усилении роли региона в развитии научных и технических инноваций (рис. 5). Внутри предусмотрены современные офисные помещения с прозрачными стеклянными перегородками, а также лабильные лабораторные зоны, способные трансформироваться в зависимости от потребностей текущих исследовательских процессов. Открытые атриумы и центральная лестница способствуют взаимодействию. Здание расположено вдоль главной кампусной магистрали, которая напрямую соединяет центр Фейетвилла с районом, где уже есть стартап-

инкубаторы, арт-коридоры и центры поддержки предпринимательства. Такое расположение призвано стереть границы между академическими исследованиями и растущей инновационной экономикой региона.



Рис. 5. Научно-венчурная студия Университета Арканзаса
[<https://hga.com/university-of-arkansas-opens-new-home-for-the-institute-for-integrative-innovative-research-a-hub-for-convergent-research-and-economic-development/>]

Особенности пространственного формирования стартап-студий

Перечень зон стартап-студий варьируется и во многом зависит от существующей архитектурно-планировочной ситуации, т. к. большинство университетских стартап-площадок в начале своего существования размещены в существующих вузовских пространствах и организованы по принципу адаптации и интеграции. Соответственно уровень комфорта и удобства каждой конкретной зоны определяется степенью соответствия требованиям, предъявляемым к современному инновационному пространству со схожей функциональной организацией. Стоит отметить, что на данный момент большинство примеров архитектурно-пространственной организации отечественных стартап-студий уступает зарубежным аналогам не только в силу отсутствия собственных площадок, но и общего отставания по формированию университетских пространств, особенно в регионах.

При этом, студия должна выступать многофункциональной площадкой, позволяющей полноценно реализовать весь цикл работы над инновационным продуктом, начиная от первоначальной концепции и заканчивая успешным внедрением на рынок. Современные университетские пространства, безусловно, имеют большой пространственный потенциал для интеграции подобных площадок при ее формировании. Тем более, что часть зон уже присутствуют в современных университетских пространствах. А создание университетских стартап-студий – общемировая тенденция, активно набирающая обороты и оправдывающая себя. Структуру идеальной пространственной модели (рис. 6) можно представить следующим образом:

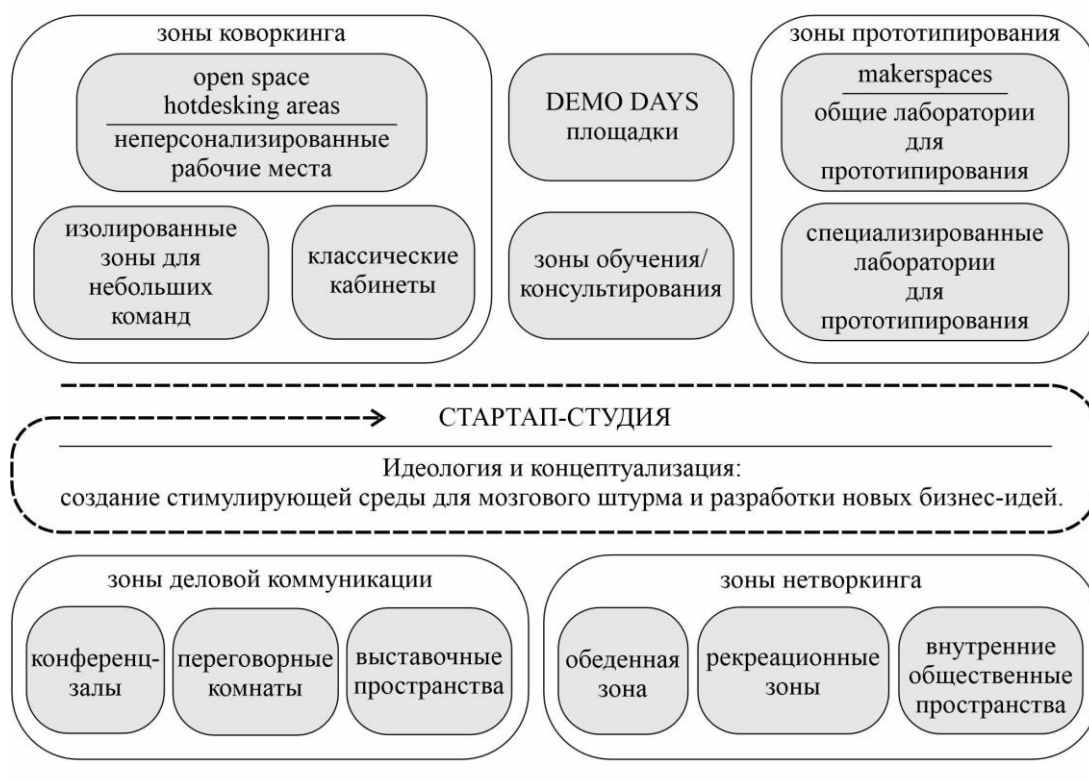


Рис. 6. Пространственная модель стартап-студии

Архитектурные особенности стартап-студий как в российском, так и в международном опыте часто демонстрируют интеграцию и вариативность использования, как основные принципы формирования пространства. Это проявляется в наличии функциональных зон, предназначенных для совместной работы, творчества и коммуникации участников в пространствах существующего коворкинга университета (при наличии) + использование специализированных пространств в виде лабораторий и испытательных центров для прототипирования продукта. Для эффективного функционирования таких студий предпочтительно создавать гибкую среду, позволяющую свободно трансформировать пространство в зависимости от текущих потребностей как стартап-студии в целом, так и отдельных команд.

Организация подобной среды возможна несколькими способами:

- зонированный (разделенный) – модульное помещение с легкими перегородками и мобильной мебелью, быстро адаптируемой под любые цели и задачи;
- открытый – свободное пространство без физических границ, обеспечивающее тесное взаимодействие всех участников;
- перетекающий – пространство с плавным переходом между различными зонами, поддерживающее ощущение единства и непрерывности рабочего процесса;
- комбинированный – смешанный тип пространства, объединяющий закрытые и открытые зоны для оптимального сочетания приватности и коллаборации.

Таким образом, к принципам формирования стартап-пространств можно отнести: гибкость и модульность, адаптируемость, доступ к



высокотехнологичному оборудованию, вариативность, открытость и коллаборация, многофункциональность, баланс открытых и закрытых зон [10], интерактивность и цифровизация, а также связь с деловыми центрами города.

Выводы

Согласно мировым тенденциям, современные университеты выступают не только центрами передачи знаний и подготовки квалифицированных специалистов, но и ключевыми игроками в научном прогрессе, технологическом развитии и экономическом росте государств. А университетские стартап-студии выступают новыми локомотивами в структуре инфраструктуры экономического развития университетов.

Проведенное исследование позволило выявить основные особенности формирования университетских стартап-студий:

1. Определена функционально-пространственная структура университетских стартап-студий и содержание функциональных этапов в работе УСС;
2. Выявлены модели университетских стартап-площадок по особенностям их функционирования;
3. Предложена идеальная пространственная модель стартап-студии при университете;
4. Предложены варианты и способы организации архитектурно-пространственной среды УСС для эффективного функционирования площадок;
5. Сформулированы принципы организации стартап-пространств.

Архитектурно-планировочная структура стартап-студий должна сочетать функциональность, эстетику и способность стимулировать творчество и сотрудничество, являясь инструментом для поддержания инновационного климата и процветания студенческого предпринимательства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зинов, В. Г. Университетские стартап-студии как новая модель трансфера технологий / В. Г. Зинов, Н. Г. Куракова // ЭКО. – 2022. – № 4. – С. 57–80. – DOI 10.30680/ECO0131-7652-2022-4-57-80.
2. Минобрнауки России. Платформа университетского технологического предпринимательства. – URL: https://minobrnauki.gov.ru/platform_utp/ (дата обращения: 10.10.2025). – Текст : электронный.
3. Минобрнауки России. Платформа университетского технологического предпринимательства. Федеральный проект «Технологии». Новости. – URL: https://minobrnauki.gov.ru/platform_utp/ (дата обращения: 10.10.2025). – Текст : электронный.
4. Дианова-Клокова, И. В. Общественные пространства в структуре научно-инновационной деятельности / И. В. Дианова-Клокова, Д. А. Метаньев // Системные технологии. – Москва. – 2021. – № 2 (39). – С. 61–70. – EDN WYTTKZ.
5. Резкин, П. Е. Стартап как форма ведения бизнеса / П. Е. Резкин, У. И. Галешова // Вестник Полоцкого государственного университета. – Полоцк, 2022. – № 12. – С. 73–80. – DOI 10.52928/2070-1632-2022-62-12-73-80.
6. Moiana, D. Venture studios: Beyond entrepreneurial support organisations? A case study analysis and framework / D. Moiana, A. Ghezzi, A. Rangone // Proceedings of the 19th european conference on innovation and entrepreneurship. Paris-Nanterre, France, 2024.
7. Global Startup Studio Network (GSSN) Пост популярности стартап-студий. – URL: <https://technospark.ru/wp-content/uploads/2020/11/the-rise-of-startup-studios-white-paper.pdf>. (дата обращения: 07.10.2025). – Текст : электронный.

8. Фонд содействия инновациям в республике Крым. Стартап-студии при университетах. – URL: <https://fasie82.ru/index.php/poleznye-statii/99-startap-studii-pri-universitetakh> (дата обращения: 06.10.2025). – Текст : электронный.

9. Дущев, М. В. В круге актуальных смыслов архитектурного средоформирования / М. В. Дущев. – Текст : электронный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2025. – № 3. – С. 136–143. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_83017119_27980172.pdf.

10. Тукмакова, М. И. Архитектурные принципы формирования креативных пространств / М. И. Тукмакова, И. А. Фахрутдинова // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2018. – № 4 (46). – С. 116–124. – EDN YTDWOD.

SKOPINTSEV Anatoliy Veniaminovich, candidate of architecture, professor of the chair of architectural and environmental design; KITAEVA Irina Vladimirovna, postgraduate student of the chair of architectural and environmental design

FEATURES OF THE FORMATION OF UNIVERSITY STARTUP STUDIOS

Southern Federal University, Academy of Architecture and Arts.

39, Budyonovsky Prospect, Rostov-on-Don, 344080, Russia.

Tel.: (863) 240-21-78; e-mail: aai@sfedu.ru

Key words: startup studio, university innovation spaces, startup studio models, startup studio structure.

This article examines the development of university startup studios. Effective practices for organizing startup spaces are explored, demonstrating a positive relationship between the quality of the environment and the success of innovative projects. Various models of university startup studios are described, highlighting the principles of their organization and operation.

REFERENCES

1. Zinov V. G., Kurakova N. G. Universitetskie startap-studii kak novaya model transfera tekhnologii [University Startup Studios as a New Model of Technology Transfer]. EKO [ECO]. Moscow, 2022, № 4, P. 57–80.

2. Minobrnauki Rossii. Platforma universitetskogo tekhnologicheskogo predprinimatelstva. [Ministry of Education and Science of the Russian Federation. University Technological Entrepreneurship Platform]. URL: https://minobrnauki.gov.ru/platform_utm (accessed: 10.10.2025).

3. Minobrnauki Rossii. Federalnyi projekt "Tekhnologii". Platforma universitetskogo tekhnologicheskogo predprinimatelstva. Novosti. [Ministry of Education and Science of the Russian Federation. Federal Project "Technologies." University Technological Entrepreneurship Platform. News]. URL: https://minobrnauki.gov.ru/platform_utm (accessed: 10.10.2025).

4. Dianova-Klokov I. V., Metanov D. A. Obshchestvennye prostranstva v strukture nauchno-innovatsionnoi deyatel'nosti [Public spaces in the structure of scientific and innovative activities]. Sistemnye tekhnologii [Systems technologies]. Moscow, 2021, № 39, P. 60–69.

5. Rezhkin P. E., Galeshova U. I. Startap kak forma vedeniya biznesa [Startup as a form of business]. Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Polotsk State University]. Polotsk, 2022, № 12, P. 73–80.



6. Moiana D., Ghezzi A, Rangone A. Venture Studios: Beyond Entrepreneurial Support Organisations? A Case Study Analysis and Framework. Proceedings of the 19th European Conference on Innovation and Entrepreneurship. Paris-Nanterre, France, 2024.

7. Global Startup Studio Network (GSSN) The rise of startup-studios white paper.pdf – URL: <https://technospark.ru/wp-content/uploads/2020/11/the-rise-of-startup-studios-white-paper.pdf>. (accessed: 07.10.2025).

8. Predstavitelstvo fonda sodeistviya innovatsiyam v Krymu. Startap-studii pri universitetakh [Representative office of the Innovation Assistance Fund in Crimea. Startup studios at universities]. URL: <https://fasie82.ru/index.php/poleznye-statii/99-startap-studii-pri-universitetakh> (accessed: 06.10.2025).

8. Dutsev M. V. V krugе aktualnykh smyslov arkhitekturnogo sredoformirovaniya [In the circle of current meanings of architectural environment formation]. Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhny Novgorod, 2025, № 3, P. 136–143.

10. Tukmakova M. I., Fahrutdinova I. A. Arkhitekturnye printsipy formirovaniya kreativnykh prostranstv [Architectural principles for the formation of creative spaces]. Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering]. Kazan, 2018, № 4 (46), P. 116–124.

© **А. В. Скопинцев, И. В. Китаева, 2026**

Получено: 30.10.2025 г.



УДК 711.4:712:504

А. В. ЛЕНЬКО, канд. архитектуры, доц. кафедры ландшафтной архитектуры и садово-паркового строительства

ЗАДАЧИ ФОРМИРОВАНИЯ ВОДНО-ЗЕЛЕННОГО КАРКАСА НИЖЕГОРОДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 433-93-92; эл. почта: voroninaannav@gmail.com

Ключевые слова: водно-зеленый каркас, (градо-) экологический каркас, документы территориального планирования, Нижегородская агломерация.

Опираясь на опыт разработки водно-зеленого каркаса (ВЗК) Нижегородской агломерации, в статье определены основные задачи к формированию карты ВЗК в документах территориального и стратегического планирования. Приводится перечень основных и дополнительных элементов ВЗК, дается определение межселенных экологических коридоров, раскрываются особенности формирования ВЗК агломерации.

В 2025 году проект «Биогород. Водно-зеленый каркас Нижегородской агломерации» [1] вошел в топ-100 Форума «Сильные идеи для нового времени», по результатам которого вышло указание Президента РФ: рассмотреть вопрос «внедрения биосферных технологий (градоэкологического каркаса) в территориальном и стратегическом планировании городского развития, в том числе при разработке мастер-планов развития городов и агломераций» [2]. Такая мера потребует разработки методики включения градоэкологического каркаса и составляющих его подструктур, в том числе водно-зеленого каркаса, в состав схем территориального планирования (СТП), генеральных планов и мастер-планов.

Работа над водно-зеленым каркасом потребовала целого ряда предварительных исследований, проводимых в период с 2009 по 2016 гг., частично опубликованных в 2022 году в монографии «От ландшафтной архитектуры к ландшафтной инфраструктуре. Нижегородский опыт» [3] и статьях [4]. В процессе работы были задействованы: работа с архивными источниками и статистическими данными, анализ ранее выполненной градостроительной документации, картографический метод, сбор и анализ количественных показателей озелененных и природных территорий, натурное обследование, сценарное моделирование и другие.

Также был рассмотрен целый ряд утвержденных генеральных планов других городов с целью определения элементов и требований к формированию ВЗК. Анализ показал, что на тематических картах отображаются: ядра и коридоры, буферные зоны ВЗК, определяется иерархия элементов: 1–3-го порядка. Обязательному отображению подлежат существующие и проектируемые особо охраняемые природные территории (ООПТ), резервные территории для их создания. Предварительным этапом является комплексный анализ территории и компонентов окружающей среды.



При формировании ВЗК Нижегородской агломерации в ГБУ «Институт развития агломераций Нижегородской области» нами были выявлены следующие задачи:

1. Обеспечение территориальной связанности: объединения природных и озелененных территорий в единую территориально-пространственную структуру на базе гидрографической сети и геоморфологии ландшафта.

Опорными элементами являются: озелененные территории общего пользования, ООПТ, лесопарковый зеленый пояс, земли лесфонда, водные объекты: малые и крупные реки и их бассейны, водно-болотные угодья, овражно-балочная сеть, лечебно-оздоровительные местности, курорты и природные лечебные ресурсы. Среди параметров определения опорных элементов: наличие природоохранного статуса, высокая степень сохранности местных экосистем и биоразнообразия, отсутствие инвазивных видов, низкая степень антропогенного влияния: отсутствие шумового, светового и химического загрязнения, а также необремененность инженерной инфраструктурой, влияющей на фрагментацию почвы и воздушного бассейна. Основу ВЗК формируют ООПТ со слабонарушенным ландшафтом.

Дополнительными элементами, при условии их озеленения на 40–60 % и более, служат: санитарно-защитные зоны, озелененные территории ограниченного пользования, земли сельскохозяйственного назначения, питомники, рекреационные комплексы, кладбища, участки для ведения личного подсобного хозяйства, научно-производственные объекты с низким процентом застройки и интеграцией природных процессов в технологический цикл, рыболовные хозяйства и т. д. К дополнительным элементам ВЗК предъявляются требования: коэффициента природности [5], процента застройки, степени проницаемости ограждающих конструкций, близости к опорным элементам каркаса [6], экологической безопасности, отсутствия различных видов загрязнения.

При формировании ВЗК необходимо обеспечить связанность именно опорных элементов, используя дополнительные элементы лишь в качестве буферных зон и образующих «ландшафтный матрикс», а также снизить фрагментарность элементов при работе с топологией.

В рамках подготовительных работ дается оценка связанности [С. 55, 6] ВЗК, отмечаются места утраченных и необходимых для восстановления связей и создание новых опорных элементов. Для Н. Новгорода мониторинг популяций видов живых организмов и актуализация списков видов живых организмов, занесенных в Красную книгу Нижегородской области, проводился в 2023 году [7], что позволило на неразмежеванных ранее участках выделить целый ряд объектов, предлагаемых в качестве новых опорных элементов ВЗК.

2. Обеспечение связанности природных территорий города с его окружением: ВЗК является непосредственным продолжением экологического каркаса муниципального округа, агломерации, региона. Его необходимо рассматривать не изолированно для каждого города, а в системе городов [8]. На данном этапе формирования Нижегородской агломерации важно зафиксировать на границах городов: крупные лесопарковые массивы, оказывающие стабилизирующий эффект [9], зеленые пояса и межселенные экологические коридоры – линейные элементы, представляющие собой протяженные участки местообитаний, которые облегчают миграцию особей во фрагментированном

ландшафте и связывают отдельные слабонарушенные экосистемы. Выделение подобных коридоров направлено на пространственную структуризацию агломерации, замедление конурбации, снижение риска формирования островов тепла, создания буферных зон с наветренной стороны промышленных зон.

На карте ВЗК обозначаются ключевые места сопряжений природных территорий внутри административной черты с природными территориями за ее пределами, фиксируются лесные массивы, зоны с высоким уровнем влажности, обеспечивающие стабилизирующий эффект и ключевые ландшафты.

3. Фиксация и определение иерархии линейных элементов каркаса. Основными элементами, выполняющими роль коридоров, являются бассейны рек, каналы, протяженные участки сложного рельефа овраги, склоны. Дополнительными: снего-, ветро-, шумозащитные лесополосы, озеленение транспортных магистралей, бульвары. Степень природности и качество озеленения экологических коридоров влияют на выполнение их связующей роли между средами, поэтому к коридорам предъявляются требования: многоярусности озеленения, непрерывности цветения, проницаемости, сохранения природного характера или включения природоподобных технологий [10]. Эффективность экологического коридора определяется по самой узкой его части.

4. Равномерное распределение озелененных и природных территорий и соблюдение иерархии элементов рекреации. В рамках аналитической части производится анализ доступности озелененных и природных территорий, определяется степень рекреационной нагрузки на природно-рекреационный комплекс, рассчитывается обеспеченность жителей зелеными насаждениями, а также оценивается тенденция к сокращению или увеличению зеленого фонда города, определяется наличие пешеходных озелененных связей вблизи социально значимых учреждений.

5. Обеспечение сохранности водных ресурсов. Обязательному отображению на схеме ВЗК подлежат водные объекты: реки, дренажные и ливневые каналы, озера, пруды, болота, зоны подтопления и затопления, подземные источники, прибрежные защитные полосы и водоохранные зоны. Построение ВЗК и дополнение его элементами водно-зеленой инфраструктуры опирается на бассейновый подход. Предварительный анализ включает оценку уровня запечатанности почв и существующего состояния ливневой канализации, выявление наиболее уязвимых участков. При работе над ВЗК Н. Новгорода крайне полезным был Паспорт гидрометеорологической безопасности [11], программы адаптации к изменениям климата, аэрофотоснимки, демонстрирующие индекс *NDVI* — нормализованный относительный индекс растительности.

6. Обеспечение здоровой среды для населения. Решение о создании пыле- и шумозащитных полосах древесно-кустарниковых насаждений определяются на основе данных мониторинга загрязнения и динамики ветровых потоков с выделением наиболее проблемных участков. Анализ застройки Н. Новгорода показал, что в 70 % случаев полосы озеленения, рекомендуемые со стороны промышленных зон вдоль селитебных и административно-деловых зон — отсутствуют, не соблюдается процент озеленения санитарно-защитных зон. При разработке ВЗК Н. Новгорода мы опирались на данные о санитарно-эпидемиологическом благополучии населения [12] и статистику экологически



обусловленных заболеваний. В крупных городах, именно нестационарные источники оказывают 75 % загрязнения воздуха, критической ситуацией оказывается для перекрестков и транспортных развязок. По данным исследований, интенсивное озеленение основных площадей Н. Новгорода снизит уровень заболеваемости органов дыхания у жителей на 25 % [13]. В условиях плотной застройки озеленение УДС – основной инструмент обеспечения природно-рекреационных связей. На карте ВЗК отображают озеленение улиц и дорог, участки реконструкции. Дополнением к тематической карте ВЗК является комплексная программа озеленения транспортных магистралей.

7. Согласование схемы транспортного развития и ВЗК: выявление проблемных участков, определение приемов снижения риска ухудшения экологической ситуации при строительстве дорог: устройство безопасных переходов, экодуков, строительство дорог на эстакадах. Одной из проблем генеральных планов крупнейших городов России, в том числе Н. Новгорода, является устройство новых дорог в долинах малых рек. Такая практика требует скорейшего пересмотра подходов развития транспортной инфраструктуры. В рамках ВЗК Нижегородской агломерации предлагается создание ряда линейных парков вдоль малых рек.

8. Учет территорий, подверженных риску возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

9. Взаимодействие с социокультурным и туристическим каркасом. В структуру ВЗК включаются объекты культурного и природного наследия, зоны охраняемого ландшафта, произведения ландшафтной архитектуры и садово-паркового искусства, культурные ландшафты, которые объединяются сетью озелененных пешеходных и туристических маршрутов. Смежно с ВЗК рекомендуется разработать Схему эстетических ресурсов ландшафта и Растительный «дизайн-код» города.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Учитывая сложность и многофакторность ВЗК, отображение его на карте функционального зонирования недостаточно, необходимо включить в состав документов территориального планирования отдельную тематическую карту, целью которой будет формирование экологической и природно-рекреационной связанности территорий. Такая мера потребует внесения изменений в Градостроительный кодекс РФ и ряд других основополагающих законов.

2. Разработка ВЗК в Генеральном плане – продолжение Схемы природно-экологического каркаса региона, которую необходимо включить в состав Схем территориального планирования с целью обеспечения экологической безопасности региона.

3. Учитывая динамику развития агломераций, крайне важно уже на данном этапе зафиксировать на границах городов крупные межселенные экологические коридоры и крупные лесные массивы, оказывающие стабилизирующий эффект. Поэтому в рамках разработки стратегий развития агломераций крайне рекомендуется выполнение раздела ВЗК.

4. Разработка ВЗК требует целого комплекса междисциплинарных исследований, рекомендуется проводить эту работу на базе ГИС ОГД.

5. Внедрение ВЗК в градостроительную деятельность потребует определения предельных параметров элементов основных и дополнительных элементов ВЗК в Правилах застройки и землепользования, а также увязке требований к

содержанию элементов ВЗК в Правилах благоустройства, региональных нормативах градостроительного проектирования и целом ряде муниципальных программ.

6. Выявленные в ходе разработки и обобщенные в данной статье задачи формирования ВЗК направлены на подготовку единой методической основы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биогород – Национальная экологическая и климатическая инициатива – Сильные идеи для нового времени. – URL: <https://идея.росконгресс.рф/improject-145438/ideas/151474> (дата обращения 20.02.2026). – Текст : электронный.

2. Сильные идеи для нового времени : по итогам пленарного заседания пятого ежегодного форума : по итогам пленарного заседания пятого ежегодного форума : поручение Президента Российской Федерации от 26.08.2025 Пр-1930. – URL : <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders?ysclid=mqj84og1nn358018223>. – Текст : электронный.

3. Воронина, О. Н. От ландшафтной архитектуры к ландшафтной инфраструктуре. Нижегородский опыт : монография / О. Н. Воронина, А. В. Воронина. – Нижний Новгород : Кварц, 2022. – 368 с. – ISBN 978-5-6047453-7-3.

4. Воронина, А. В. Нижний Новгород: к вопросу о парадигме «город-природа» в постиндустриальный период / А. В. Воронина // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2015. – № 3 (35). – С. 172–177.

5. Вергунов, А. П. Архитектурно – ландшафтная организация крупного города / А. П. Вергунов. – Ленинград : Стройиздат, 1982. – 152 с. : ил.

6. Хански, И. Ускользящий мир. Экологические последствия утраты местообитаний : перевод с английского / И. Хански. – 2-е изд. – Москва : Т-во научных изданий КМК, 2015. – 340 с. – ISBN 978-5-9906071-6-3.

7. Актуализация списков видов живых организмов, занесенных в Красную книгу Нижегородской области и приложения к ней, и мониторинг популяций видов живых организмов, занесенных в Красную книгу Нижегородской области : информационный отчет о выполнении государственного контракта № 02 23 от 05.06.2023 г. / С. В. Бакка, Н. Ю. Киселева, П. М. Шуков, О. Р. Галустьян ; Министерство экологии и природных ресурсов Нижегородской области. – Нижний Новгород, 2023. – 207 с.

8. Ленъко, А. В. Водно-зеленый каркас: город-агломерация-регион / А. В. Ленъко, Д. В. Толовёнкова // Архитектура, Строительство, Дизайн. – 2024. – № 01/02 (114/115). – С. 41–45.

9. Соболев, Н. А. Задачи восстановления и поддержания природного каркаса в степной и лесостепной зоне / Н. А. Соболев // Агроэкологический вестник. – Москва, 2003. – № 7. – С 31–35.

10. Ленъко, А. В. Элементы водно-зеленого городского каркаса. Пространственные и качественные характеристики / А. В. Ленъко // Ландшафтная архитектура. Актуальные вопросы науки и практики : материалы XX Всероссийской научно-практической конференции, Нижний Новгород, 20 марта 2024 года / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2024. – С. 3–9.

11. Паспорт гидрометеорологической безопасности Нижегородской области. – URL: <http://meteo.ru/wp-content/uploads/2024/04/pasport-gmb-nizhegorodskoj-oblasti.pdf>. – Текст : электронный.

12. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Нижегородской области в 2024 году». – URL: https://52.rospotrebnadzor.ru/upload/iblock_content/52_gosdoklad_2024_n.o_.pdf. – Текст : электронный.



13. Большакова, А. Д. Роль зеленых насаждений в повышении качества здоровья городского населения (на примере г. Нижнего Новгорода) / А. Д. Большакова, Н. И. Зазнобина, Т. А. Ковалева // Самарский научный вестник / Самарский государственный социально-педагогический университет. – Самара, 2023. – Т. 12, № 1. – С. 27–33.

LENKO Anna Vladimirovna, candidate of architecture, associate professor of the chair of landscape architecture and construction of gardens and parks

STRATEGIC OBJECTIVES FOR DEVELOPING THE BLUE-GREEN FRAMEWORK OF THE NIZHNY NOVGOROD AGGLOMERATION

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (831) 433-93-92; e-mail: voroninaannav@gmail.com

Key words: blue-green framework, urban-ecological framework, territorial planning documents, Nizhny Novgorod agglomeration.

Based on the experience of developing the blue and green framework (BGF) of the Nizhny Novgorod agglomeration, the article defines the main objectives for creating a blue and green framework map in territorial and strategic planning documents. It provides a list of the main and additional elements of the BGF, defines suburban ecological corridors, and reveals the features of creating the BGF of the agglomeration.

REFERENCES

1. Biogorod – Natsionalnaya ekologicheskaya i klimaticheskaya initsiativa – Silnye idei dlya novogo vremeni [Biogorod – National Environmental and Climate Initiative – Strong Ideas for a New Time]. – URL: <https://идея.росконгресс.рф/improject-145438/ideas/151474> (accessed: 20.02.2026).

2. Silnye idei dlya novogo vremeni [Strong Ideas for a New Time]: po itogam plenarnogo zasedaniya pyatogo ezhegodnogo foruma : po itogam plenarnogo zasedaniya pyatogo ezhegodnogo foruma : poruchenie Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 26.08.2025 Pr-1930. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders?ysclid=mqj84og1nn358018223> (accessed: 21.06.2026).

3. Voronina O. N., Voronina A. V. Ot landshaftnoy arkhitektury k landshaftnoy infrastrukture. Nizhegorodskiy opyt [From landscape architecture to landscape infrastructure. Nizhny Novgorod experience]. Nizhny Novgorod, Kvarts, 2022, 368 p. ISBN 978-5-6047453-7-3.

4. Voronina A. V. Nizhny Novgorod: k voprosu o paradigme «gorod-priroda» v postindustrialnyy period [Nizhny Novgorod: on the question of the "city-nature" paradigm in the post-industrial period]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2015, № 3 (35), P. 172–177.

5. Vergunov A. P. Arkhitekturno-landshaftnaya organizatsiya krupnogo goroda [Architectural and landscape organization of a large city]. Leningrad, Stroyizdat, 1982, 152 p.

6. Khanski I. Uskolzayushchiy mir. Ekologicheskie posledstviya utraty mestoobitaniy [The vanishing world. Ecological consequences of habitat loss]. 2nd ed. Moscow, T-vo nauchnykh izdaniy KMK, 2015, 340 p. ISBN 978-5-9906071-6-3.

7. Bakka S. V., Kiseleva N. Yu., Shukov P. M., Galustyan O. R. Aktualizatsiya spiskov vidov zhivyykh organizmov, zanesennykh v Krasnuyu knigu Nizhegorodskoy oblasti i prilozheniya k ney, i monitoring populyatsiy vidov zhivyykh organizmov, zanesennykh v



Krasnuyu knigu Nizhegorodskoy oblasti [Updating the lists of living organism species included in the Red Data Book of the Nizhny Novgorod Region and its appendix, and monitoring the populations of living organism species included in the Red Data Book of the Nizhny Novgorod Region]: informatsionnyy otchet o vypolnenii gosudarstvennogo kontrakta № 02 23 ot 05.06.2023 g.. Ministerstvo ekologii i prirodnykh resursov Nizhegorodskoy oblasti. Nizhny Novgorod, 2023, 207 p.

8. Lenko A. V., Tolovenkova D. V. Vodno-zeleny karkas: gorod-aglomeratsiya-region [Blue-green framework: city-agglomeration-region]. Arkhitektura, Stroitelstvo, Dizayn [Architecture, Construction, Design]. 2024, № 01/02 (114/115), P. 41–45.

9. Sobolev N. A. Zadachi vosstanovleniya i podderzhaniya prirodnogo karkasa v stepnoy i lesostepnoy zone [Tasks of restoration and maintenance of the natural framework in the steppe and forest-steppe zone]. Agroekologicheskiy vestnik [Agroecological Bulletin]. Moscow, 2003, № 7, P. 31–35.

10. Lenko A. V. Elementy vodno-zelenogo gorodskogo karkasa. Prostranstvennye i kachestvennye kharakteristiki [Elements of the blue-green urban framework. Spatial and qualitative characteristics]. Landshaftnaya arkhitektura. Aktualnye voprosy nauki i praktiki [Landscape architecture. Current issues of science and practice]: materialy XX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Nizhny Novgorod, 20 marta 2024 goda. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2024, P. 3–9.

11. Pasport gidrometeorologicheskoy bezopasnosti Nizhegorodskoy oblasti [Passport of hydrometeorological safety of the Nizhny Novgorod Region]. URL: <http://meteo.ru/wp-content/uploads/2024/04/pasport-gmb-nizhegorodskoj-oblasti.pdf>.

12. Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii sanitarno-epidemiologicheskogo blagopoluchiya naseleniya v Nizhegorodskoy oblasti v 2024 godu» [State report "On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population in the Nizhny Novgorod Region in 2024"]. URL: https://52.rosпотребнадзор.ru/upload/iblock_content/52_gosdoklad_2024_n.o_.pdf.

13. Bolshakova A. D., Zaznobina N. I., Kovaleva T. A. Rol zelenykh nasazhdeniy v povyshenii kachestva zdorovya gorodskogo naseleniya (na primere g. Nizhnego Novgoroda) [The role of green spaces in improving the health quality of the urban population (case study of Nizhny Novgorod)]. Samarskiy nauchnyy vestnik [Samara Scientific Bulletin]. Samarskiy gos. sotsialno-pedagogicheskiy un-t. Samara, 2023, Vol. 12, № 1, P. 27–33.

© А. В. Ленько, 2026

Получено: 06.02.2026 г.



УДК 728.1(569.5)

Рана Башир Еид АЛЬ РАБАДИ, аспирант; В. В. ГАЛИШНИКОВА, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры архитектуры, реставрации и дизайна

РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРНАЯ ИДЕНТИКА В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОЙ ТИПИЗАЦИИ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ: КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОЙ АРХИТЕКТУРЫ ИОРДАНИИ

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы».

Россия, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

Тел.: (991) 854-82-66, эл. почта: 1042235145@pfur.ru

Тел.: (915) 379-24-68, эл. почта: galishnikova-vv@rudn.ru

Ключевые слова: архитектурная идентика; жилая архитектура; вернакулярная архитектура; регионализм; глобализация архитектуры; типизация жилой застройки; морфология застройки; климатоориентированное проектирование; пространственная организация; архитектура Иордании.

В статье рассматривается проблема трансформации региональной архитектурной идентики в условиях глобальной типизации современной жилой застройки. Актуальность исследования обусловлена процессами унификации архитектурных решений, распространением стандартизированных проектных моделей и снижением выразительности жилой среды в странах Ближнего Востока. В качестве предмета анализа выступает современная жилая архитектура Иордании, формирующаяся под влиянием международных типологических и конструктивных моделей.

Архитектурная идентика интерпретируется как многоуровневая система пространственных, морфологических, климатоадаптивных и материально-конструктивных характеристик, обеспечивающих устойчивую связь архитектуры с региональным контекстом. В работе формируется аналитическая модель оценки степени сохранения идентики жилой среды, включающая критерии пространственной организации, морфологии застройки, иерархии приватности, системы переходных пространств и использования локальных материалов.

Проводится сопоставительный анализ вернакулярной жилой архитектуры Иордании и современной жилой застройки с целью выявления механизмов сохранения и утраты региональных характеристик. Установлено, что в современной архитектурной практике наблюдается частичная формальная адаптация традиционных элементов при одновременной утрате пространственной и климатической логики вернакулярной модели. Сделан вывод о необходимости разработки механизмов интеграции вернакулярных принципов в современное проектирование как основы формирования устойчивой архитектурной идентики жилой среды.

Введение

В последние десятилетия развитие архитектуры все в большей степени определяется глобальными процессами, связанными с распространением типовых проектных решений и унификацией строительных технологий. На практике это приводит к тому, что жилая застройка в разных странах начинает приобретать сходные пространственные и визуальные характеристики. В результате постепенно ослабевает связь архитектуры с конкретным региональным контекстом, включая климатические, культурные и социальные особенности.

Особенно заметно это в странах Ближнего Востока, где традиционная архитектура изначально формировалась как ответ на жесткие природно-климатические условия. В Иордании историческая жилая застройка представляла собой систему решений, направленных не только на обеспечение комфорта, но и на организацию приватного пространства в соответствии с социальными нормами. Внутренние дворы, система переходных зон, использование локальных материалов – все эти элементы работали как единая структура.

Современная практика проектирования развивается в иной логике. Значительное влияние оказывают экономические факторы, ускоренные темпы строительства и ориентация на универсальные модели. В таких условиях традиционные принципы либо трансформируются, либо сохраняются только на уровне отдельных элементов. При этом нередко утрачивается их функциональное значение.

В научной литературе архитектурная идентика рассматривается не как совокупность внешних признаков, а как система взаимосвязанных характеристик, включающая пространственную организацию, морфологию застройки, климатоадаптивные решения и материальную основу архитектуры. Поэтому анализ изменений в жилой среде требует рассмотрения этих элементов в комплексе.

В данной работе внимание сосредоточено на сопоставлении традиционной и современной жилой архитектуры Иордании. Такой подход позволяет более точно выявить, какие именно характеристики сохраняются, а какие утрачиваются в условиях типизации застройки.

Цель исследования

– определить, в какой степени современная жилая архитектура Иордании сохраняет признаки региональной идентики. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

- уточнить содержание понятия архитектурной идентики и критерии ее анализа;
- рассмотреть особенности вернакулярной жилой архитектуры Иордании;
- сопоставить традиционную и современную модели жилой застройки.

В качестве методологической основы использован сравнительно-типологический анализ, а также элементы системного подхода, позволяющие рассматривать жилую среду как целостную структуру.

1. Архитектурная идентика жилой среды как системная категория

В современной архитектурной теории понятие идентики рассматривается как комплексная характеристика архитектурной среды, отражающая ее устойчивые пространственные, морфологические и материальные особенности, формирующие узнаваемость и контекстуальную обоснованность архитектурного образа [1]. В отличие от стилистического подхода, идентика не сводится к совокупности визуальных признаков, а определяется структурными характеристиками пространственной организации и конструктивной логики архитектуры.

Исследования, посвященные проблемам региональной архитектуры, подчеркивают, что идентика формируется в результате взаимодействия природно-климатических, культурных и социально-экономических факторов [2; 3]. В этом контексте жилая среда рассматривается как многоуровневая система, в которой



пространственные и морфологические параметры оказывают определяющее влияние на формирование устойчивого архитектурного образа.

Архитектурная идентика жилой среды проявляется на нескольких взаимосвязанных уровнях. Пространственный уровень включает характер планировочной структуры, систему переходных зон и иерархию приватности. Морфологический уровень отражает плотность и масштаб застройки, конфигурацию кварталов и характер взаимодействия объемов. Климатоадаптивный уровень связан с ориентацией зданий, глубиной проемов и механизмами защиты от перегрева. Материально-конструктивный уровень определяется использованием локальных материалов и характером ограждающих конструкций [4; 5].

Рассмотрение идентики как системной категории позволяет перейти от анализа отдельных фасадных решений к выявлению закономерностей формирования жилой среды в региональном контексте. В условиях глобализации архитектурной практики и распространения типовых проектных решений наблюдается тенденция к унификации пространственных и морфологических характеристик застройки, что приводит к снижению региональной выразительности и утрате устойчивых структурных признаков [2].

Архитектурную идентичку жилой среды целесообразно рассматривать как совокупность взаимосвязанных параметров, которые проявляются на разных уровнях – от планировочной структуры до используемых материалов. В этом смысле важно учитывать не отдельные элементы, а их взаимодействие в рамках единой системы.

2. Вернакулярная модель жилой архитектуры Иордании как структурная основа региональной идентики

Вернакулярная жилая архитектура Иордании формировалась в условиях жаркого и засушливого климата, ограниченности водных ресурсов и выраженной социальной структуры традиционного общества. Архитектурная форма традиционного жилища развивалась как результат многовековой адаптации к экстремальным температурным условиям, высокой инсоляции и необходимости обеспечения приватности внутреннего пространства [6, 7]. В отличие от современной типовой застройки, ориентированной на универсальные строительные решения, вернакулярная модель представляла собой целостную пространственно-конструктивную систему.

Пространственная организация традиционного иорданского жилища строилась по принципу внутренней ориентации. Центральным элементом планировочной структуры выступал внутренний двор, вокруг которого формировалась система жилых и хозяйственных помещений. Такая композиция обеспечивала четкую иерархию пространств: от внешней среды через входную зону и полуоткрытые переходные пространства к приватным внутренним помещениям. Последовательность пространственных переходов формировала защищенный характер жилой среды и соответствовала социальным нормам и культурным установкам региона [8].

Внутренний двор играл ключевую роль в обеспечении микроклиматического комфорта. За счет конвекционных потоков воздуха и создания затененных зон двор способствовал естественной вентиляции и снижению температуры прилегающих помещений. Исследования показывают, что дворовая структура в жарком климате обеспечивает более стабильный температурный режим по

сравнению с открытой планировкой [9]. Наличие растительности и водных элементов усиливало охлаждающий эффект, формируя благоприятную среду для проживания.

Морфологическая структура традиционной застройки отличалась компактностью и плотностью. Невысокая этажность, массивность объемов и минимизация внешних проемов были направлены на сокращение тепловой нагрузки и защиту от прямого солнечного воздействия. Плотное расположение зданий способствовало взаимному экранированию фасадов, формируя затененные уличные пространства и снижая перегрев застройки в целом [6]. Такая морфология обеспечивала не только климатическую эффективность, но и визуальную целостность архитектурной среды.

Климатоадаптивность являлась базовым принципом формирования архитектурной формы. Ограждающие конструкции традиционных домов отличались значительной толщиной и выполнялись преимущественно из локального природного камня. Высокая тепловая инерция каменной кладки позволяла аккумулировать тепло в дневное время и постепенно отдавать его в ночные часы, сглаживая суточные колебания температуры [7]. Ограниченное количество внешних проемов, их глубина и ориентация также способствовали регулированию светового и теплового режима.

Материально-конструктивная система вернакулярного жилища основывалась на использовании доступных природных ресурсов региона. Камень не только обеспечивал прочность и долговечность зданий, но и формировал характерный визуальный образ застройки, органично связанный с ландшафтом. Фактура, цвет и текстура материала становились элементами региональной выразительности, усиливая ощущение принадлежности архитектуры к конкретной территории [4].

Существенное значение имела система переходных пространств – навесов, галерей, входных зон и полуоткрытых площадок. Эти элементы выполняли буферную функцию между внешней средой и внутренними помещениями, обеспечивая постепенное изменение температурных и световых условий. Переходные пространства усиливали пространственную глубину архитектуры и формировали характерный сценарий восприятия жилой среды. Их наличие позволяло смягчать климатические воздействия и одновременно поддерживать социальную структуру взаимодействия внутри дома.

Важным аспектом вернакулярной модели являлась иерархия приватности. Пространственная организация дома обеспечивала разграничение общественных, полупубличных и частных зон, что соответствовало культурным традициям и социальным нормам региона [8]. Такая иерархия закреплялась не только планировочно, но и конструктивно – через последовательность переходных пространств и ограниченную визуальную проницаемость внешних фасадов.

В совокупности пространственная структура, морфология застройки, климатоадаптивные механизмы и материально-конструктивные решения образовывали целостную архитектурную модель. Эта модель характеризовалась внутренней логикой и устойчивостью, обеспечивая гармоничное взаимодействие архитектуры с природно-климатическим и культурным контекстом. Региональная идентика формировалась не за счет декоративных особенностей, а посредством системной взаимосвязи архитектурной формы и условий среды.



Таким образом, вернакулярная жилая архитектура Иордании представляет собой структурно организованную систему, в которой пространственные, морфологические и климатические принципы формируют устойчивую региональную идентичку. Данная модель выступает аналитическим эталоном для сопоставления с современной жилой застройкой и позволяет выявить степень сохранения либо трансформации ее структурных характеристик в условиях глобализированной типизации архитектуры.

3. Применение вернакулярных принципов в формировании идентички современной жилой среды

Современная жилая архитектура Иордании формируется в условиях активной урбанизации, демографического роста и интеграции в глобальные экономические процессы. Развитие девелоперской модели строительства, ориентированной на стандартизацию проектных решений и сокращение затрат, привело к широкому распространению типовых многоквартирных жилых зданий и индивидуальных домов с унифицированной планировочной структурой. В результате пространственные и морфологические характеристики застройки претерпели существенные изменения по сравнению с вернакулярной моделью.

На уровне пространственной организации современное жилье демонстрирует отход от принципа внутренней ориентации. В большинстве новых жилых зданий отсутствует дворовая структура как композиционный и климатический центр дома. Планировочные решения ориентированы преимущественно на максимизацию полезной площади и обеспечение прямого выхода помещений на внешние фасады. Это приводит к сокращению количества переходных пространств и упрощению иерархии приватности. Визуальная и функциональная граница между внешней средой и внутренним пространством становится менее выраженной, что свидетельствует о трансформации традиционной пространственной логики [8].

Морфология современной застройки также отличается от исторической модели. В крупных городах, прежде всего в Аммане, наблюдается рост многоэтажной жилой застройки с увеличенной плотностью и вертикальной доминантой. Хотя плотность в целом сохраняется, она реализуется по иным принципам – через вертикальное наращивание объемов, а не через компактную горизонтальную структуру кварталов. В результате изменяется масштаб среды и характер восприятия жилых пространств. Утрата взаимного экранирования и формирование открытых фасадных плоскостей усиливают воздействие солнечной радиации, что снижает климатическую эффективность застройки.

Климатоадаптивные механизмы в современной жилой архитектуре зачастую заменяются инженерными системами кондиционирования и механической вентиляции. При этом пассивные способы регулирования микроклимата, характерные для вернакулярной архитектуры – глубоко утопленные проемы, экранирование фасадов, дворовая структура – используются фрагментарно или носят декоративный характер [6]. Подобная трансформация свидетельствует о смещении приоритетов от климатической логики к технологической компенсации климатических нагрузок.

Материально-конструктивная система современной застройки также претерпела изменения. Несмотря на сохранение камня как облицовочного материала, его использование зачастую носит формальный характер. Каменная отделка применяется как фасадная облицовка, не обладая теми

теплоаккумулирующими свойствами, которые имели массивные каменные стены традиционных домов. Таким образом, материальность утрачивает функциональное содержание и становится преимущественно визуальным элементом [4].

Особое внимание следует уделить трансформации системы приватности. Исследования, посвященные современной жилой архитектуре Иордании, показывают, что изменение образа жизни и структуры семьи привело к перераспределению функций внутри жилища [8]. Однако при этом новая планировочная структура не воспроизводит последовательность переходных пространств, характерную для традиционной модели. Отсутствие полуоткрытых буферных зон приводит к более резкому переходу от публичного пространства к приватному, что изменяет характер взаимодействия человека с архитектурной средой.

Сопоставление традиционной и современной застройки по выбранным критериям показывает, что часть характеристик сохраняется, однако их роль в структуре жилой среды существенно меняется. В современной практике наблюдается формальное заимствование отдельных традиционных мотивов – использование камня, декоративных экранов или арочных форм, – однако данные элементы функционируют вне структурной логики вернакулярной модели. Отсутствие дворовой структуры, переходных пространств и пассивных климатических механизмов свидетельствует о разрыве между формой и ее функциональным содержанием (табл.).

Таким образом, современная жилая архитектура Иордании демонстрирует трансформацию региональной идентичности на структурном уровне. Идентификационные признаки сохраняются преимущественно в визуально-декоративной плоскости, тогда как пространственная, морфологическая и климатическая логика традиционной модели утрачивает системность. Глобализированная типизация жилой застройки приводит к формированию архитектурной среды, частично адаптированной к региональному контексту, но не воспроизводящей его структурную основу.

В этой связи сохранение региональной архитектурной идентичности требует перехода от формального цитирования традиционных элементов к разработке механизмов интеграции вернакулярных принципов в современное проектирование. Только при условии восстановления пространственной и климатической логики формирования жилой среды возможно формирование устойчивой архитектурной модели, способной соединить современные строительные технологии и региональную специфику.

Таблица

Сравнительный анализ структурных характеристик вернакулярной и современной жилой архитектуры Иордании

| Критерий анализа | Вернакулярная модель | Современная модель |
|------------------------------------|--|---|
| Пространственная организация | Внутренняя ориентация; двор как композиционный центр; последовательность переходных пространств; выраженная иерархия приватности | Отсутствие дворовой структуры; ориентация помещений на внешние фасады; сокращение переходных зон; упрощенная иерархия приватности |
| Морфология застройки | Компактная горизонтальная структура; невысокая этажность; взаимное экранирование зданий; масштаб, соразмерный человеку | Вертикализация застройки; увеличение этажности; открытые фасадные плоскости; изменение масштаба жилой среды |
| Климатоадаптивные механизмы | Пассивная регуляция микроклимата; массивные стены; глубокие проемы; дворовая вентиляция; естественное затенение | Замещение пассивных решений инженерными системами; фрагментарное применение солнцезащиты; формальная адаптация традиционных элементов |
| Материально-конструктивная система | Локальный камень как конструктивная основа; высокая тепловая инерция; связь материала с ландшафтом | Камень преимущественно как облицовка; облегченные конструкции; ослабление функциональной роли материала |
| Система приватности | Четкая пространственная иерархия; постепенный переход от публичного к приватному | Более прямой переход; сокращение буферных зон; изменение сценария взаимодействия |
| Характер региональной идентичности | Системная, структурно закрепленная, основанная на пространственной и климатической логике | Частично визуальная; декоративная адаптация без воспроизведения структурной логики |

Представленные в таблице данные подтверждают, что трансформация современной жилой архитектуры Иордании затрагивает не отдельные элементы, а структурные уровни формирования идентичности. Сохранение визуальных мотивов не компенсирует утрату пространственной и климатической логики, лежащей в основе вернакулярной модели. Таким образом, ключевая проблема современной практики заключается в разрыве между формой и ее функционально-контекстуальным содержанием.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что региональная архитектурная идентичность не ограничивается внешними признаками, а формируется за счет совокупности пространственных, морфологических и климатических характеристик. Именно их взаимодействие обеспечивает устойчивость архитектурной модели в конкретных условиях.

Традиционная жилая архитектура Иордании демонстрирует высокий уровень адаптации к климату и социальным особенностям региона. Ее структура основана на внутренней ориентации пространства, использовании дворов, системе



переходных зон и локальных материалов. Эти решения были взаимосвязаны и обеспечивали не только функциональность, но и целостность архитектурного образа.

Современная жилая застройка развивается по иным принципам. В ней усиливается роль экономических и технологических факторов, что приводит к упрощению пространственной структуры и изменению морфологии застройки. При этом отдельные элементы традиционной архитектуры могут сохраняться, но чаще всего они теряют свою первоначальную функцию и используются формально.

Таким образом, изменения затрагивают не только внешний облик зданий, но и глубинную логику их формирования. Это свидетельствует о трансформации архитектурной идентичности на структурном уровне.

В этих условиях особое значение приобретает поиск способов интеграции вернакулярных принципов в современную практику проектирования. Речь идет не о копировании традиционных форм, а о переосмыслении их функциональной и пространственной логики с учетом современных требований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Norberg-Schulz, C. *Genius loci: towards a phenomenology of architecture* / C. Norberg-Schulz. – New York : Rizzoli, 1980. – 213 с.
2. Al-Qawasmi, J. Architectural identity in contemporary housing of the arab world / J. Al-Qawasmi // *Archnet-IJAR*. – 2021. – Vol. 15, No. 2. – P. 247–262.
3. Abu-Ghazze, T. Vernacular architecture and the search for urban identity in the Middle East / T. Abu-Ghazze // *Journal of architectural and planning research*. – 2021. – Vol. 38, No. 4. – P. 289–305.
4. Малахов, А. В. Вернакулярная архитектура как ресурс формирования идентичности архитектурной среды / А. В. Малахов // *Архитектон: известия вузов*. – 2023. – № 2. – С. 45–54.
5. Сафронова, Н. Ю. Регионализм в современной архитектуре как фактор сохранения идентичности застроенной среды / Н. Ю. Сафронова // *Вестник гражданских инженеров*. – 2021. – № 6. – С. 28–36.
6. Al-Hammadi, A. Climate-responsive strategies of courtyard housing in hot arid regions / A. Al-Hammadi, B. Abu-Hijleh // *Frontiers of architectural research*. – 2022. – Vol. 11, No. 3. – P. 420–432. – DOI 10.1016/j.foar.2022.04.006.
7. Fathy, H. Climate-conscious architecture and the relevance of vernacular principles today / H. Fathy // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15, No. 7. – Art. 5794. – DOI 10.3390/su15075794.
8. Alzoubi, H. H. Privacy as a motivating factor for spatial layout transformation in Jordanian housing / H. H. Alzoubi, A. A. Alshboul // *City, territory and architecture*. – 2022. – Vol. 9. – DOI 10.1186/s40410-022-00163-9.
9. Al-Jameel, A. Courtyard houses as a tool for microclimate regulation in hot climates / A. Al-Jameel, A. Hassan // *Energy and buildings*. – 2025. – Vol. 305. – Art. 113015. – DOI 10.1016/j.enbuild.2024.113015.



AL-RABADI Rana Basheer Eid, postgraduate student; GALISHNIKOVA Vera Vladimirovna, doctor of technical sciences, professor, professor of the chair of architecture, restoration and design

**REGIONAL ARCHITECTURAL IDENTITY IN THE CONTEXT OF GLOBAL
STANDARDIZATION OF HOUSING DEVELOPMENT:
A CRITICAL ANALYSIS OF CONTEMPORARY ARCHITECTURE IN
JORDAN**

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba.

6, Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russia.

Tel.: (991) 854-82-66, e-mail: 1042235145@pfur.ru

Tel.: (915) 379-24-68, e-mail: galishnikova-vv@rudn.ru

Key words: architectural identity; residential architecture; vernacular architecture; regionalism; architectural globalization; standardized housing; urban morphology; climate-responsive design; spatial organization; Jordan architecture.

The article examines the transformation of regional architectural identity in the context of global standardization of housing development. The relevance of the study is determined by the widespread use of unified architectural solutions and imported typological models, which often lead to the weakening of regional specificity in residential environments across the Middle East. Contemporary residential architecture in Jordan is considered as the object of analysis.

Architectural identity is interpreted as a multi-level system that includes spatial, morphological, climate-responsive and material and structural characteristics ensuring contextual continuity of the built environment. The study proposes an analytical framework for evaluating the degree of identity preservation in residential architecture, based on criteria such as spatial organization, urban morphology, hierarchy of privacy, transitional spaces and the use of local materials.

A comparative analysis of vernacular residential architecture in Jordan and contemporary housing development is conducted in order to identify mechanisms of preservation and transformation of regional characteristics. The results demonstrate that contemporary practice often involves formal adaptation of traditional elements while neglecting the spatial and climatic logic of vernacular models. The article concludes that the development of mechanisms for integrating vernacular principles into modern architectural design is essential for fostering a sustainable regional architectural identity.

REFERENCES

1. Norberg-Schulz C. Genius loci: towards a phenomenology of architecture. New York: Rizzoli, 1980, 213 p.
2. Al-Qawasmi J. Architectural identity in contemporary housing of the arab world. Archnet-IJAR, 2021, Vol. 15, No. 2, P. 247–262.
3. Abu-Ghazze T. Vernacular architecture and the search for urban identity in the Middle East. Journal of architectural and planning research. 2021, Vol. 38, No. 4, P. 289–305.
4. Malakhov A. V. Vernakularnaya arkhitektura kak resurs formirovaniya identichnosti arkhitekturnoy sredy [Vernacular architecture as a resource for forming the identity of the architectural environment]. Arkhitekton: izvestiya vuzov [Architecton: Proceedings of Higher Education]. Samara, 2023, № 2, P. 45–54.
5. Safronova N. Yu. Regionalizm v sovremennoy arkhitekture kak faktor sokhraneniya identichnosti zastroyennoy sredy [Regionalism in contemporary architecture as a factor in



preserving the identity of the built environment]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. Saint Petersburg, 2021, № 6, P. 28–36.

6. Al-Hammadi A., Abu-Hijleh B. Climate-responsive strategies of courtyard housing in hot arid regions. *Frontiers of architectural research*. 2022, Vol. 11, No. 3, P. 420–432. DOI 10.1016/j.foar.2022.04.006.

7. Fathy H. Climate-conscious architecture and the relevance of vernacular principles today. *Sustainability*. 2023, Vol. 15, No. 7, Art. 5794. DOI 10.3390/su15075794.

8. Alzoubi H. H., Alshboul A. A. Privacy as a motivating factor for spatial layout transformation in Jordanian housing. *City, territory and architecture*. 2022, Vol. 9. DOI 10.1186/s40410-022-00163-9.

9. Al-Jameel A., Hassan A. Courtyard houses as a tool for microclimate regulation in hot climates. *Energy and buildings*. 2025, Vol. 305, Art. 113015. DOI 10.1016/j.enbuild.2024.113015.

© Рана Башир Еид Аль Рабади, В. В. Галишникова, 2026

Получено: 31.03.2026 г.



УДК 727.57

С. Х. АЛАМ ЭЛЬ ДИН¹, аспирант; **И. Н. ГАРЬКИН¹**, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой архитектуры, реставрации и дизайна Инженерной академии; **В. А. КУРОЧКИНА**, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры архитектуры, реставрации и дизайна Инженерной академии¹, доц.²

ЭВОЛЮЦИЯ АРХИТЕКТУРНЫХ ПРИНЦИПОВ ФОРМИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ КОНЦЕПЦИИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

¹ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы».

Россия, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

Тел.: (999) 852-39-44, эл. почта: sabrina.alameldin@yandex.ru

Тел.: (909) 321-98-78, эл. почта: garkin-in@pfur.ru

²ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Тел.: (977) 291-72-05, эл. почта: kurochkina-va@rudn.ru

Ключевые слова: инновационный центр, устойчивая архитектура, энергоэффективность, биофильный дизайн, наукоград.

В условиях глобального энергоперехода и перехода к низкоуглеродной экономике научно-исследовательские центры (НИЦ), являясь генераторами «зеленых» инноваций, часто остаются крупными потребителями ресурсов. Возникает противоречие между миссией центра и его реальным экологическим следом. В работе выделены три ключевые тенденции: переход от пассивной энергоэффективности к активной энергогенерации и автономности; углубленная интеграция в природный контекст через биофильный дизайн; переосмысление планировочной структуры в направлении социальной устойчивости и гибкости. Проанализирована эволюция архитектурной модели НИЦ от закрытых наукоградов СССР к открытым многофункциональным кластерам современной России, выявлены принципы многофункциональности, доступности и модульности. Выявлено, что современный научный центр эволюционирует от изолированного «храма науки» к открытой, адаптивной экосистеме, где архитектура становится активным научным инструментом, демонстрационной платформой «зеленых» технологий и ключевым фактором привлечения талантов.

Введение

Архитектура научных центров на протяжении XX века прошла сложный путь – от закрытых лабораторных корпусов, ориентированных на узкие военно-промышленные задачи, до открытых кампусов, призванных стимулировать междисциплинарную коммуникацию и интеграцию науки, образования и бизнеса. Однако в начале XXI века к традиционным функциональным и репрезентативным задачам добавилась третья задача – экологическая. В эпоху глобальных климатических изменений и декларируемого перехода к низкоуглеродной экономике научные центры, призванные генерировать «зеленые» технологии, более не могут оставаться крупными потребителями ресурсов.

Одновременно с этим в России происходит возрождение интереса к наукоемким производствам и инновационным кластерам. Становление инновационных кластеров в России можно рассматривать с развития наукоградов

в СССР с конца 1930-х годов, однако после распада СССР произошел длительный период стагнации [1]. Лишь после 2000-х годов начинается активное воссоздание и модернизация научной инфраструктуры, что актуализирует задачу переосмысления архитектурных принципов проектирования таких объектов.

Материалы и методы

Методы исследования определяются на теоретические основы устойчивой архитектуры и типологической эволюции научно-инновационных центров [1, 2]. Особое внимание уделено адаптивным структурам, изученным в контексте планировочных решений инновационных центров.

Методология исследования сформирована на основе комплексного подхода и включает следующие методы: *историко-типологический анализ*, направленный на выявление этапов эволюции архитектурных решений научных центров (в диапазоне от советских наукоградов до современных научно-технологических кластеров); *сравнительный анализ* архитектурно-планировочных решений ведущих российских научных центров; *метод обобщения*, обеспечивающий систематизацию выявленных проектных приемов в рамках обобщенных тенденций и базовых принципов [3].

Результаты

Анализ исторического развития показывает, что архитектура наукоемких производств в России прошла несколько этапов. В СССР, начиная с конца 1930-х годов, формировались наукограды – закрытые или полужакрытые поселения, объединявшие жилые зоны, производственные корпуса и научные лаборатории. В основе проектирования советских наукоградов лежал принцип функционального зонирования городской территории, в котором предусматривалось выделение жилых массивов, зон производственных предприятий и рекреационных территорий. При этом многие наукограды были обособлены от крупных городов, имели значительную площадь застройки и ориентировались преимущественно на военно-промышленные направления.

После распада СССР развитие научных центров в России практически остановилось. Лишь в 2000-х годах начинается возрождение этой типологии: с 2010 года реализуется проект инновационного центра «Сколково», с 2012 года Министерство экономического развития РФ запускает программу поддержки инновационных территориальных кластеров [4]. Современные научные центры отличаются открытостью для города, многофункциональностью (сочетание науки, образования, бизнеса и рекреации), размещением в городской среде или в непосредственной близости от нее, а также ориентацией на широкий спектр научных направлений.

В процессе анализа проектной практики и теоретических источников установлено, что принципы устойчивого развития стали системообразующими факторами, формирующими архитектуру НИЦ на всех уровнях – от градостроительного до деталей интерьера. Выделены три основных направления трансформации.

Современные научные центры проектируются не как здания с низким энергопотреблением, а как активные элементы энергосистемы – так называемые «здания с положительным энергетическим балансом», что соответствует принципам устойчивой архитектуры. Достижение такого статуса обеспечивается синергией пассивных и активных стратегий проектирования.

Пассивные стратегии представляют собой комплекс архитектурно-планировочных и конструктивных решений, минимизирующих потребность здания в энергии без задействования механических систем. К ним относятся: оптимальная ориентация здания по сторонам света; компактность формы; высокоэффективная теплоизоляция; организация естественной вентиляции; применение светоотражающих покрытий.

Активные стратегии включают инженерные системы, генерирующие энергию или использующие возобновляемые источники. Они предполагают интеграцию таких решений непосредственно в архитектурную структуру здания: фасады и кровля трансформируются в генерирующие поверхности (с использованием солнечных батарей, тонкопленочных фотомодулей, интегрированных в остекление); применяются геотермальные тепловые насосы, где свайное поле фундамента выполняет функцию теплообменника.

Такой подход знаменует переход от парадигмы «меньшего вреда» к парадигме «активного вклада». Для научных центров, призванных формировать технологический уклад будущего, это означает трансформацию архитектуры из нейтральной оболочки в демонстрационную платформу. Здание не только снижает эксплуатационные расходы, но и выполняет образовательную и исследовательскую функции, выступая в роли натурной лаборатории для тестирования энергоэффективных технологий. Примером может служить Инновационный город «Иннополис» (рис. 1 цв. вклейки), где активно применяются интеллектуальные системы электроснабжения, система «замкнутая водная петля» в семиэтажном административно-деловом центре им. А. С. Попова – в замкнутой трубе, опоясывающей корпус технопарка, циркулирует вода с постоянной температурой, для поддержания которой используются специальные тепловые насосы. Они при необходимости забирают «лишнее» тепло из помещений, требующих охлаждения, и отправляют его туда, где необходим обогрев [5].

Принцип минимизации воздействия на среду приводит к отказу от агрессивного противопоставления здания природе. НИЦ все чаще проектируются по принципу «встройки» в ландшафт. Биофильный дизайн здесь обретает новое значение: он не только улучшает психоэмоциональное состояние исследователей (снижение стресса, повышение креативности), но и становится частью научной работы. Озелененные атриумы, зимние сады и экспериментальные «живые» фасады используются как полигоны для тестирования новых биотехнологий в реальных условиях [6].

В российской практике принципы устойчивости и биофильности находят отражение в проектах реновации ДСК-500 (Тюмень, бюро *HADAA*) (рис. 2 цв. вклейки) и технопарка «Густав» (Москва, бюро *IND*), где активно используются природные материалы, озеленение и гибкие планировочные структуры [6–8].

Устойчивость понимается не только в экологическом, но и в социальном ключе. Пространства научных центров проектируются как открытые, гибкие кластеры, стимулирующие междисциплинарное взаимодействие. Вместо коридорной системы и изолированных лабораторий формируются многосветные атриумы, вокруг которых группируются рабочие зоны. Эти атриумы становятся «интеллектуальным каркасом» здания, вмещающая зоны неформального общения, рекреации и коллективной работы. Архитектура закладывает потенциал

**К СТАТЬЕ С. Х. АЛАМ ЭЛЬ ДИН, И. Н. ГАРЬКИНА, В. А. КУРОЧКИНОЙ
«ЭВОЛЮЦИЯ АРХИТЕКТУРНЫХ ПРИНЦИПОВ ФОРМИРОВАНИЯ
ИННОВАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ КОНЦЕПЦИИ
УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ»**



Рис. 1. Мастер-план Иннополиса

[https://www.tssonline.ru/articles/gorod-budushchego-na-primere-innopolisa?hs_amp=true]

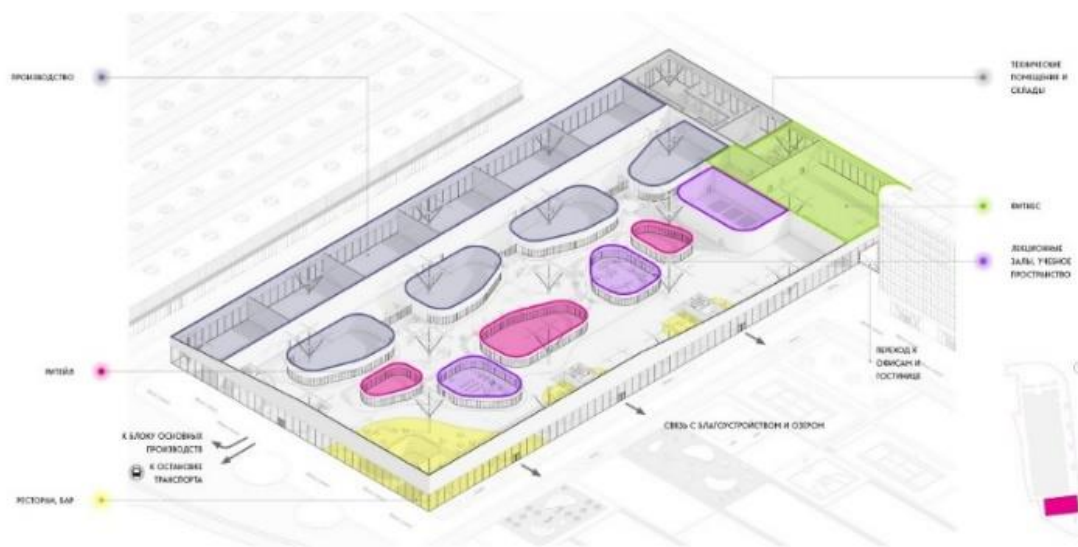


Рис. 2. Пространственное устройство ДСК-500 (Россия)

[<https://archi.ru/projects/russia/17835/dsk>]



Рис. 3. Вид сверху *Paris-Saclay* (Франция)
[<https://simple.wikipedia.org/wiki/Paris-Saclay>]



Рис. 4. Вид сверху Сколково (Россия)
[<https://stroimsk.ru/interviews/kak-razvivaietsia-skolkovo>]

трансформации: использование модульных перегородок, фальшполов для легкого подключения инженерных коммуникаций, универсальных планировочных ячеек [7, 8].

Обобщение опыта проектирования и реализации российских инновационных центров (Сколково, Иннополис, ИНТЦ МГУ, технопарк «Густав» и др.) позволило выделить ряд базовых принципов, которые дополняют и конкретизируют идеи устойчивой архитектуры применительно к научной инфраструктуре [9]:

Открытость – территория кластера становится частью городской среды, стираются барьеры между наукой и обществом. ИНТЦ МГУ «Воробьевы горы» проектируется как открытый для города научный квартал, интегрированный в транспортную и рекреационную инфраструктуру.

Устойчивость (экологичность) – применение возобновляемых материалов, энергосберегающих технологий, систем сбора и переработки ресурсов. В Иннополисе реализованы принципы «зеленого» строительства, включая использование местных материалов и энергоэффективных инженерных систем.

Эргономичность – масштаб пространств соответствует человеку, обеспечивается комфортная среда для длительной интеллектуальной работы. В проекте «Сколково» уделялось особое внимание созданию пешеходных зон, общественных пространств и комфортных рабочих мест.

Доступность – вся инфраструктура находится в шаговой доступности, что сокращает временные затраты и способствует неформальному общению. Принцип «15-минутного города» активно используется в планировке инновационных кластеров.

Полезность площади – территории наукоемких предприятий становятся многофункциональными, т. е. формируется некий город в городе.

Поэтапное строительство – предоставляет возможность размещения инновационных кластеров с возможностью дальнейшего территориального расширения в пределах установленных границ участка, в процессе развития территории и открытия первостепенных объектов.

Современные инновационные кластеры эволюционируют из изолированных научных центров в комплексные многофункциональные урбанистические системы, в которых научные учреждения, жилая застройка, природные территории и транспортная инфраструктура образуют единую взаимосвязанную структуру. Данный подход, определяемый как градостроительный симбиоз, характеризуется тремя ключевыми аспектами:

- функциональная интеграция – объединение лабораторий, жилых кварталов, рекреационных зон и транспортных узлов в целостную планировочную систему;

- экологическая синергия – гармоничное и взаимовыгодное сосуществование застроенных территорий и природных рекреационных пространств;

- социальная связанность – формирование условий для устойчивого взаимодействия между учеными, предпринимателями и местным населением [10].

В качестве подтверждения изложенных выше аспектов можно обратиться к отечественным и мировым примерам реализации данной концепции. Как один из наиболее ярких примеров среди мирового опыта проектирования можно считать *Paris-Saclay* (Франция) (рис. 3 цв. вклейки) – где прослеживается концепция



«города-ковра», в которой научные корпуса органично интегрированы в зеленый каркас территории;

Ярким примером отечественной реализации данной концепции является «Сколково» (Россия) (рис. 4 цв. вклейки) – кластер, объединяющий *R&D*-центры, образовательные кампусы, парковые зоны и станции МЦД в единую систему.

Обсуждение

Выявленные тенденции согласуются с глобальным трендом на снижение вреда окружающей природе в строительной отрасли и создание устойчивой городской среды. При этом для научных центров характерен ряд специфических особенностей.

Анализ международных проектов подтверждает, что здания инновационных центров трансформируются в самостоятельные научные инструменты. Так, *InnoRenew CoE* (Словения) и *BMC R&D Center* (Турция) функционируют как натурные лаборатории, где тестируются инновационные материалы и технологии [11].

В российском контексте развитие современных научных центров происходит в условиях переосмысления наследия советской эпохи. В отличие от наукоградов СССР, которые отличались: *закрытостью; монофункциональностью; ориентацией на военно-промышленный комплекс*, современные инновационные кластеры ориентированы на: *открытость; интеграцию с городской средой; междисциплинарность* [1, 12].

Существенное противоречие возникает между необходимостью обеспечения безопасности лабораторных процессов (в т. ч. изоляции вредных производств) и современными принципами открытости и функциональной гибкости пространств. Оптимальным решением данной проблемы выступает многоуровневое зонирование территории: размещение «чистых» общественных зон на нижних этажах здания и локализация изолированных лабораторных модулей с особым режимом эксплуатации – на верхних уровнях либо в отдельных функциональных блоках [13].

Проектирование в соответствии с международными стандартами экологической сертификации (*LEED, BREEAM*) или российским ГОСТ Р 54964-2012 выполняет двойную функцию: *обеспечивает снижение эксплуатационных расходов за счет энергоэффективности и ресурсосбережения; служит маркетинговым инструментом, подтверждающим статус научного центра как передовой организации* [14].

Таким образом, архитектура современного инновационного центра становится не только функциональной средой, но и научным инструментом, а также наглядным манифестом актуальных общественных приоритетов в области устойчивого развития и технологического лидерства.

Заключение

Результаты исследования доказывают: устойчивая архитектура больше не опция – она лежит в основе нового подхода к созданию инновационных центров. Происходит эволюция инновационных центров от изолированных объектов к открытым и адаптивным экосистемам. Эта эволюция сопровождается сменой принципов: *закрытость* сменяется *открытостью*, *монофункциональность* – *многофункциональностью*, *обособленность* – *интеграцией с городом*.

Ключевыми направлениями эволюции современных научных центров выступают: достижение энергетической автономии – переход от концепции

энергоэффективности к активной энергогенерации; глубокая интеграция с природным окружением посредством внедрения принципов биофильного дизайна; формирование социально-устойчивых и гибких пространств, способных адаптироваться к перспективным вызовам научно-технологического развития.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алам Эль Дин, С. Х. Особенности архитектуры научно-исследовательских центров и развитие наукоградов со времен СССР по настоящее время / Алам Эль Дин, С. Х., Н. С. Калинина // Системные технологии. – 2023. – № 1 (46). – С. 208–219.
2. Nathan, M. Agglomeration, Clusters, and Industrial Policy / M. Nathan, H. Overman. // Oxford Review of Economic Policy. – 2013. – Vol. 29. – № 2. – P. 383–404. – DOI 10.1093/oxrep/grt019.
3. Аскерова, М. Р. Как составляющая инновационной инфраструктуры: технопарки / М. Р. Аскерова // Sciences of Europe. – 2024. – № 135 (135). – С. 36–37. – DOI 10.5281/zenodo.10704387. – EDN ZBMUYZ.
4. Радионов, Т. В. Особенности формирования архитектуры научно-технологических комплексов: динамика Отечественной и зарубежной практики с учетом элементов социально-экономического развития / Т. В. Радионов, К. А. Маренков, В. А. Бугайчук // Строитель Донбасса. – 2023. – № 4 (25). – С. 6–11. – EDN TQAGMM.
5. Маренков, К. А. Современные технологические подходы в области архитектурной организации научно-образовательных центров / К. А. Маренков // Градостроительство и архитектура. – 2023. – Т. 13, № 4 (53). – С. 156–159. – DOI 10.17673/Vestnik.2023.04.20. – EDN YDTMRQ.
6. He, M. Technoparks and their role in the development of the innovative component of the Chinese economy: legal aspects / M. He // Socio-economic problems of the regions in the context of global instability, 18-19 июля 2020 года, 2020. – P. 167–171. – EDN MSJJXZ.
7. Черныльщикова, Е. С. Особенности градостроительной организации наукоградов на примере Академгородка в городе Томске / Е. С. Черныльщикова // Избранные доклады 71-й университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых : доклады конференции, Томск, 17 апреля 2025 года. – Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2025. – С. 630–638. – EDN OTZUBF.
8. Есаулов, Г. В. Устойчивая архитектура как проектная парадигма (к вопросу определения) / Г. В. Есаулов // Устойчивая архитектура: настоящее и будущее : труды Международного симпозиума, 17-18 ноября 2011 г. / Московский архитектурный институт (государственной академии) и группа КНАУФ СНГ. – Москва, 2012. – С. 76–79.
9. Ахметшина, Д. И. Основные тенденции, приемы и средства проектирования научно-исследовательских центров / Д. И. Ахметшина // Инновационная наука. – 2024. № 6-2. – С. 189–191. – EDN IMXYUW.
10. Алам Эль Дин, С. Х. Влияние принципов устойчивой архитектуры на приемы формирования архитектуры офисного здания / С. Х. Алам Эль Дин, Н. С. Калинина // Реабилитация жилого пространства горожанина : материалы XIX Международной научно-практической конференции им. В. Татлина, Пенза, 17 февраля 2023 года. – Пенза : Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2023. – С. 46–50. – EDN YQTXPU.
11. Курочкина, В. А. Архитектура будущего: принципы устойчивого развития в проектировании на примере культурных центров / В. А. Курочкина, Е. К. Калиниченко // Геоэкология: теория и практика : сборник научных трудов по материалам Всероссийской студенческой конференции с международным участием, Москва, 22-23 ноября 2024 года. – Москва : Российский университет дружбы народов им. П. Лумумбы, 2024. – С. 130–136. – EDN JDSRKT.



12. Дианова-Клокова, И. В. Виртуальные научные исследования. Архитектурные инновации / И. В. Дианова-Клокова // Academia. Архитектура и строительство. – 2024. – № 1. – С. 83–91. – DOI 10.22337/2077-9038-2023-1-83-91. – EDN OFFMMG.

13. Беженцев, А. А. Тенденции развития технопарков: инструменты государственной поддержки / А. А. Беженцев, Н. А. Игошин // Московский юридический журнал. – 2024. – № 3. – С. 19–30. – DOI 10.18384/2949-513X-2024-3-19-30. – EDN EPQFXN.

14. Yin, N. Urban road landscape design and digital twin simulation modeling analysis / N. Yin, M. Cai // Discrete dynamics in nature and society. – 2022. – Vol. 2022 (5). – Article ID 8020549.

ALAM EL DIN Sabrina Hassan¹, postgraduate student; GARKIN Igor Nikolaevich¹, candidate of technical sciences, associate professor, holder of the chair of architecture, restoration and design; KUROCHKINA Valentina Aleksandrovna, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of architecture, restoration and design¹, associate professor²

EVOLUTION OF ARCHITECTURAL DESIGN PRINCIPLES FOR INNOVATION CENTERS DRIVEN BY SUSTAINABLE DEVELOPMENT

¹Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba.

6, Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russia.

Tel.: (999) 852-39-44, e-mail: sabrina.alameldin@yandex.ru

Tel.: (909) 321-98-78, e-mail: garkin-in@pfur.ru

²Moscow State University of Civil Engineering (National Research University).

26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russia.

Tel.: (977) 291-72-05, e-mail: kurochkina-va@rudn.ru

Key words: innovation center, sustainable architecture, energy efficiency, biophilic design, science city.

In the context of the global energy transition and the shift toward a low-carbon economy, research and development centers, despite their role as drivers of “green” innovation, often remain significant resource consumers. This creates a contradiction between their sustainability mission and its actual environmental footprint. The paper identifies three key trends: the transition from passive energy efficiency to active energy generation and autonomy; the deep integration into the natural context through biophilic design; and the reconfiguration of spatial organization towards social sustainability and flexibility. The evolution of the closed Soviet-era “science cities” (naukograds) to the open multifunctional clusters of modern Russia has been analyzed, and the principles of multifunctionality, accessibility, and modular adaptability have been identified. The findings demonstrate that the contemporary research center is transforming from an isolated “temple of science” into an open, adaptive ecosystem where architecture becomes an active scientific tool, a demonstration platform for green technologies, and a key factor in attracting talent.

REFERENCES

1. Alam El Din S. Kh., Kalinina N. S. Osobennosti arkhitektury nauchno-issledovatel'skikh tsentrov i razvitie naukogradov so vremen SSSR po nastoyashchee vremya [Features of the architecture of research centers and the development of science cities from the Soviet era to the present]. Sistemnye tekhnologii [System Technologies]. 2023, № 1 (46), P. 208–219.

2. Nathan M., Overman H. Agglomeration, Clusters, and Industrial Policy. Oxford Review of Economic Policy. 2013, Vol. 29, № 2, P. 383–404. DOI: 10.1093/oxrep/grt019.
3. Askerova M. R. Kak sostavlyayushchaya innovatsionnoy infrastruktury: tekhnoparki [As a component of innovation infrastructure: technoparks]. Sciences of Europe. 2024, № 135 (135), P. 36–37. DOI: 10.5281/zenodo.10704387. EDN: ZBMUYZ.
4. Radionov T. V., Marenkov K. A., Bugaychuk V. A. Osobennosti formirovaniya arkhitektury nauchno-tekhnologicheskikh kompleksov: dinamika Otechestvennoy i zarubezhnoy praktiki s uchetom elementov sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya [Features of forming the architecture of scientific and technological complexes: dynamics of domestic and foreign practice considering elements of socio-economic development]. Stroitel Donbassa [Builder of Donbass]. 2023, № 4 (25), P. 6–11. EDN: TQAGMM.
5. Marenkov K. A. Sovremennyye tekhnologicheskie podkhody v oblasti arkhitekturnoy organizatsii nauchno-obrazovatelnykh tsentrov [Modern technological approaches in the field of architectural organization of scientific and educational centers]. Gradostroitelstvo i arkhitektura [Urban Planning and Architecture]. 2023, Vol. 13, № 4 (53), P. 156–159. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.04.20. EDN: YDTMRQ.
6. He M. Technoparks and their role in the development of the innovative component of the Chinese economy: legal aspects. Socio-economic problems of the regions in the context of global instability, 18-19 iyulya 2020 goda. 2020, P. 167–171. EDN: MSJJXZ.
7. Chernilshchikova E. S. Osobennosti gradostroitelnoy organizatsii naukogradov na primere Akademgorodka v gorode Tomske [Features of urban planning organization of science cities on the example of Akademgorodok in Tomsk]. Izbrannyye doklady 71-y universitetskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh: doklady konferentsii, 17 aprelya 2025 goda. Tomsk. Tomskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitelnyy universitet, 2025, P. 630–638. EDN: OTZUBF.
8. Esaulov G. V. Ustoichivaya arkhitektura kak proektnaya paradigma (k voprosu opredeleniya) [Sustainable architecture as a design paradigm (on the question of definition)]. Ustoichivaya arkhitektura: nastoyashchee i budushchee: trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma, 17-18 noyabrya 2011 g. Moskovskiy arkhitekturny institut (gosudarstvennoy akademii) i gruppа KNAUF SNG. Moscow, 2012, P. 76–79.
9. Akhmetshina D. I. Osnovnye tendentsii, priyomy i sredstva proektirovaniya nauchno-issledovatel'skikh tsentrov [Main trends, techniques and means of designing research centers]. Innovatsionnaya nauka [Innovative Science]. 2024, № 6-2, P. 189–191. EDN: IMXYUW.
10. Alam El Din S. Kh., Kalinina N. S. Vliyanie printsipov ustoichivoy arkhitektury na priemy formirovaniya arkhitektury ofisnogo zdaniya [Influence of sustainable architecture principles on techniques for forming office building architecture]. Reabilitatsiya zhilogo prostranstva gorozhanina: materialy XIX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii im. V. Tatlina, 17 fevralya 2023 goda. Penzenskiy gosudarstvennyy universitet arkhitektury i stroitelstva, Penza, 2023, P. 46–50. EDN: YQTXPU.
11. Kurochkina V. A., Kalinichenko E. K. Arkhitektura budushchego: printsipy ustoychivogo razvitiya v proektirovanii na primere kulturnykh tsentrov [Architecture of the future: sustainable development principles in design on the example of cultural centers]. Geoekologiya: teoriya i praktika [Geoecology: theory and practice] : sbornik nauchnykh trudov po materialam Vserossiyskoy studencheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, 22-23 noyabrya 2024 goda. Rossiyskiy universitet druzhby narodov im. P. Lumumby, Moscow, 2024, P. 130–136. EDN: JDSRKT.
12. Dianova-Klokovala I. V. Virtualnye nauchnye issledovaniya. Arkhitekturnye innovatsii [Virtual scientific research. Architectural innovations]. Academia. Arkhitektura i stroitelstvo [Academia. Architecture and Construction]. 2024, № 1, P. 83–91. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-1-83-91. EDN: OFFMMG.
13. Bezhtentsev A. A., Igoshin N. A. Tendentsii razvitiya tekhnoparkov: instrumenty gosudarstvennoy podderzhki [Development trends of technoparks: state support tools].



Moskovskiy yuridicheskiy zhurnal [Moscow Juridical Journal]. 2024, № 3, P. 19–30. DOI: 10.18384/2949-513X-2024-3-19-30. EDN: EPQFXN.

14. Yin N., Cai M. Urban road landscape design and digital twin simulation modeling analysis. Discrete Dynamics in Nature and Society. 2022, Vol. 2022 (5), Article ID 8020549.

© С. Х. Алам Эль Дин, И. Н. Гарькин, В. А. Курочкина, 2026

Получено: 31.03.2026 г.



УДК 72.01

В. С. БЕЛАН, аспирант кафедры архитектуры, реставрации и дизайна Инженерной академии¹, ген. директор²; **В. А. КУРОЧКИНА**, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры архитектуры, реставрации и дизайна Инженерной академии¹, доц.³

ПРОБЛЕМЫ ЦЕННОСТИ ЭСТЕТИКИ ИНДУСТРИАЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ В СОВРЕМЕННОМ ГОРОДЕ

¹ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы».
Россия, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

²ООО «АСК МОСПРОЕКТ-1».

Россия, 117342, г. Москва, ул. Бутлерова, д. 17.

Тел.: (495) 660-20-12 доб. 100; (964) 649-99-26; эл. почта: vs.belan@mosproject-1.ru

³ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Тел.: (977) 291-72-05, эл. почта: kurochkina-va@rudn.ru

Ключевые слова: индустриальная архитектура, ревитализация, промышленное наследие, эстетическая ценность, адаптивное повторное использование.

В статье рассматривается трансформация эстетического восприятия индустриальной архитектуры от сугубо утилитарных объектов до значимых культурных ценностей. Анализируются исторические предпосылки формирования «эстетики честного дизайна», влияние авангардных течений XX века, а также современные практики ревитализации промышленных зон. Особое внимание уделяется противоречиям, возникающим при сохранении индустриального наследия, и феномену влияния промышленных форм на массовую культуру. Методология исследования включает сравнительный анализ успешных проектов адаптации заводских территорий в России и за рубежом, а также оценку социально-экономических последствий данных проектов. В статье обосновывается вывод о многогранной природе ценности индустриальной архитектуры, включающей историко-культурный, художественный, социально-экономический и феноменологический аспекты. Результаты работы могут быть использованы при разработке стратегий развития постиндустриальных городов и охранных зон промышленного наследия.

Введение

Индустриальная архитектура длительное время оставалась за рамками академической теории, воспринимаясь исключительно как прикладная сфера, лишенная самостоятельного эстетического измерения. В критических дискурсах XIX века фабричные корпуса и заводские трубы нередко характеризовались как антиэстетичное порождение капиталистической прагматики, противопоставляемое канонам «высокой» классической архитектуры. Однако в XX столетии прагматичные формы промышленных сооружений – от водонапорных башен до стальных ферм – не только обрели статус художественной ценности, но и превратились в значимый фактор формирования идентичности постиндустриальных городов. Как справедливо замечает Кеннет Фрэмpton, «вся история неизбежно обусловлена способом видения, и невозможно написать абсолютную историю так же, как невозможно создать абсолютную



архитектуру» [1]. Индустриальные сооружения и артефакты являются частью материального и нематериального мирового наследия. В России они не сразу стали объектом общественного внимания в качестве специально изучаемых и сохраняемых ценностей [2].

Феномен эстетического освоения промышленной архитектуры восходит к эпохе индустриальной революции. Первоначально заводские корпуса возводились исключительно исходя из прагматических соображений, таких как функциональность, безопасность и эффективность производственных процессов, которые выступали приоритетными критериями. Тем не менее, во второй половине XIX века в теоретических трудах, посвященных искусству и архитектуре, начинает формироваться представление о специфической выразительности конструктивных решений.

Джон Рескин, занимавший значимое место среди искусствоведов викторианской эпохи, при всей своей критической позиции по отношению к машинному производству, неожиданным образом сформировал идейную базу для дальнейшего развития концепции «честного дизайна». В своей работе исследователь отмечал: «Архитектура есть искусство, которое так располагает и украшает сооружения, возведенные человеком для какого бы то ни было употребления, чтобы созерцание их доставляло душевное здоровье, силу и наслаждение» [3]. Это утверждение закрепляет возможность того, что объект, имеющий исключительно практическое назначение, способен влиять на психоэмоциональную сферу человека. Ключевой идеей «эстетики честного дизайна» выступает достоверность используемых материалов и конструктивных решений: архитектурная форма не должна маскировать свою функциональную суть или имитировать иные материалы. Данный тезис, впервые обозначенный Дж. Рескином, позднее был подхвачен конструктивизмом, где открытая конструкция и фактура индустриальных материалов превратились из вынужденной меры в осознанную художественную стратегию.

Существенные изменения в восприятии индустриальных форм произошли в XX веке. Представители конструктивизма и функционализма отказались от декоративных элементов в пользу конструктивной «обнаженности». Архитекторы авангарда, включая Ле Корбюзье, видели в облике заводских построек и ангаров прототип новой архитектуры, освобожденной от стилизаций прошлого. Индустриальная эстетика, ранее ассоциировавшаяся главным образом с промышленными окраинами, начала интегрироваться в жилые районы и общественные пространства.

Сегодня эстетическая значимость промышленной архитектуры наиболее полно проявляется через ревитализацию – приспособление бывших производственных территорий для новых нужд. Превращение заброшенных заводских площадок в выставочные залы, жилые лофты, культурные центры или творческие кластеры говорит о трансформации восприятия, теперь промышленный объект оценивается не как устаревший производственный механизм, а рассматривается с позиции уникальных объемно-пространственных качеств. Высокие потолки, открытые инженерные коммуникации, фактурные кирпичные стены и металлические перекрытия становятся не периферийным фоном, но ключевыми элементами нового архитектурного нарратива.

Одним из наиболее репрезентативных примеров ревитализации является преобразование электростанции «Бэнксайд», проект сэра Джайлза Гилберта

Скотта, 1947–1963, в галерею современного искусства Тейт Модерн (рис. 1). Архитектурное бюро *Herzog & de Meuron* сохранило ключевые элементы исторического сооружения – 99-метровую трубу и турбинный зал, трансформировав последний в выставочное пространство, где промышленный масштаб и фактурная кирпичная кладка вступают в диалог с актуальными арт-практиками. Как отмечал А. В. Иконников, архитектура «служит организации жизнедеятельности не только своими материальными структурами, обеспечивающими необходимые условия осуществления процессов, но и той информацией, которую она несет. Ее произведения обладают двоякой ценностью – материально-практической и информационно-эстетической» [4]. Такие знаковые примеры, как Тейт Модерн в Лондоне, иллюстрируют комплексные социальные, экономические и экологические выгоды адаптивного повторного использования зданий промышленного наследия [5].



Рис. 1. Галерея современного искусства Тейт Модерн, Лондон

[Источник: <https://www.archdaily.com/790590/modern-as-metaphor-where-the-tate-stands-in-a-post-brex-it-world>]

Отечественная практика также располагает успешными проектами адаптации промышленных территорий. Бывший пивоваренный завод «Московская Бавария», основанный в XIX веке, а затем Московский комбинат виноградных и десертных вин, в 2007 году был преобразован в первый московский арт-кластер – Центр современного искусства «Винзавод» (рис. 2). В отличие от стратегии тотального сноса, характерной для градостроительной политики 1990-х годов, здесь был реализован подход деликатной реконструкции. Краснокирпичные корпуса конца XIX – начала XX века сохранили историческую планировку и фасадные решения. В настоящее время данное пространство объединяет галереи современного искусства, дизайнерские шоурумы и архитектурные бюро. Значимость «Винзавода» заключается не только в сохранении архитектурного облика исторической промышленной зоны, но и в формировании новой идентичности городского района, что способствовало повышению инвестиционной привлекательности прилегающих территорий.



Рис. 2. Первый московский арт-кластер «Винзавод»

[Источник:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Пивоваренный_завод_\(Винзавод\)_фото_2.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Пивоваренный_завод_(Винзавод)_фото_2.jpg)]

Мировые тенденции работы с индустриальным наследием воплощает проект преобразования газового завода Вестергасфабрик (рис. 3). Построенный в 1885 году, а с 1898 года ставший муниципальным, этот комплекс к концу XX века утратил свою первоначальную функцию и оказался под угрозой сноса. Благодаря совместным усилиям городских властей и местного сообщества в 1990–2000-х годах здесь был осуществлен один из наиболее успешных в Европе проектов ревитализации. Вместо радикального демонтажа исторические кирпичные корпуса, газгольдеры и инженерные сооружения были сохранены и адаптированы под новые функции – культурные центры, кинотеатры, офисы креативных индустрий и парковые зоны. Как подчеркивают исследователи, данный проект «стал хрестоматийным примером того, как адаптивное повторное использование промышленного наследия может реализовать сохранение исторической идентичности, одновременно отвечая современным городским потребностям» [6].



Рис. 3. Парк культуры Вестергасфабрик, Амстердам

[Источник:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Westergasfabriek_\(Gashouder\)?uselang=nl](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Westergasfabriek_(Gashouder)?uselang=nl)]

Символическое значение подобных пространств выходит за пределы визуальной привлекательности. Как отмечают исследователи, в процессе адаптивного повторного использования промышленных зданий именно «физическая материальность зданий – то, как они спроектированы, спланированы, построены и поддерживаются – играет ключевую роль в создании и поддержании культурных и креативных кластеров» [7]. Фактурность старого кирпича, аутентичные бетонные полы и тектоническая выразительность промышленных корпусов формируют тот уникальный эстетический заряд, который не поддается воспроизведению в новом строительстве.

Признание индустриальной архитектуры эстетической ценностью сопряжено с рядом противоречий. Центральный конфликт заключается в дихотомии «сохранение или снос». Экономическая целесообразность освоения земель под жилую застройку нередко вступает в противоречие с необходимостью сохранения исторического промышленного наследия. В качестве иллюстрации можно привести снос гостиницы «Россия» в Москве; хотя данный объект не относится к промышленной архитектуре, он иллюстрирует общую тенденцию утраты исторического наследия, а также утрату значительной части корпусов ЗИЛа.

Кроме того, существует проблема «музеефикации», то есть преобразование завода в выставочное пространство или галерею может привести к утрате его изначальной «рабочей» сущности, превращению промышленного объекта в «гламурную» декорацию. Сохранение эстетической ценности в данном контексте требует деликатного подхода, при котором новая функция не нивелирует, но акцентирует подлинность промышленной формы. Как отмечает С. В. Наумова, современные творческие концепции ревитализации предлагают различные стратегии взаимодействия с историческим наследием, позволяющие выстраивать диалог между промышленным прошлым и актуальными функциями настоящего [8]. Существует многообразие стратегий, методов и подходов к адаптации, выведенных из первоначального функционального назначения промышленных комплексов к использованию в среде современного города: «реновация», «реставрация», «ревитализация», «реконструкция», «конверсия», «рефункционализация» [9].

Отдельный аспект ценности индустриальной архитектуры составляет ее влияние на массовую культуру и дизайн. Эстетика лофта, брутализм и стимпанк, черпающие вдохновение в промышленной архитектуре, стали устойчивыми трендами в интерьерном и графическом дизайне. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что ценность индустриальной архитектуры перешла из сферы узкопрофессиональных интересов в область широкого культурного потребления. Промышленные объекты приобретают статус знаковых мест притяжения, формируя новую идентичность городских пространств. Как отмечают Н. Н. Ляпцев и С. В. Наумова, «в настоящее время в связи с изменением требований к организации жизнедеятельности в крупных промышленных городах и отказом от тиражируемых «усредненных» моделей перед проектировщиками возникает проблема выработки новых ценностей и ориентиров» [10]. Образцы промышленной архитектуры не просто выполняют утилитарную функцию в городском пространстве, но и оказывают влияние на формирование образа города, отражающего ценностные доминанты и ориентиры его жителей, стратегии развития [11].

Заключение

Эстетика индустриальной архитектуры представляет собой многогранную ценность. Проведенный анализ и рассмотренные примеры позволяют выделить несколько ключевых аспектов данной ценности (табл.):

1. *Историко-культурная ценность.* Индустриальные объекты выступают в качестве документальных свидетельств технологических эпох, фиксируя эволюцию инженерной мысли и социально-экономических отношений. Утрата таких сооружений ведет к разрушению материальной памяти города.

2. *Художественно-формальная ценность.* Выразительность конструкций, тектоничность, фактурность промышленных материалов (кирпича, металла, бетона) формируют уникальную эстетику, востребованную в современной архитектурной практике и дизайне.

3. *Социально-экономическая ценность.* Практика ревитализации демонстрирует, что грамотная адаптация промышленных зон способствует не только сохранению архитектурного облика, но и становится драйвером экономического развития территорий, привлекая инвестиции, туристические потоки и креативные индустрии.

4. *Феноменологическая ценность.* Промышленная архитектура предлагает современному человеку уникальный опыт взаимодействия с подлинным, «нестерильным» пространством, что приобретает особое значение в эпоху доминирования цифровой среды и типовой застройки. Как подчеркивает Фрэнсис Д. К. Чинь, «наше бытие постоянно заключено в пространство. Мы движемся сквозь объем, видим формы и объекты. Пространство – это материальная субстанция. Когда пространство начинает восприниматься, ограничиваться, формироваться и организовываться элементами массы, начинает существовать архитектура» [12].

Таблица

Аспекты ценности индустриальной архитектуры

| Вид ценности | Суть | Пример |
|---------------------------------|---|--|
| Историко-культурная | Документальное свидетельство технологических эпох | Корпуса «Винзавода» как память о промышленном развитии Москвы |
| Художественно-формальная | Эстетика конструкции и фактуры материалов | Кирпичная кладка и открытые коммуникации в Тейт Модерн |
| Социально-экономическая | Драйвер развития территорий через адаптацию | Рост инвестиционной привлекательности районов с креативными кластерами |
| Феноменологическая | Опыт взаимодействия с подлинным пространством | Тактильность старых материалов в эпоху цифровой виртуальности |

Перед архитекторами, градостроителями и обществом стоит задача не механического сохранения всех промышленных зданий, но выработки дифференцированной стратегии, позволяющей выявлять объекты, обладающие высоким эстетическим потенциалом. Успех рассмотренных проектов доказывает, что инвестиции в сохранение промышленного наследия окупаются не только экономически, но и культурно, способствуя формированию уникальной городской среды, свободной от близости массовой застройки. Только такой подход позволит сохранить для будущих поколений «индустриальную романтику» – уникальный пласт архитектурного наследия, определяющий характер современного города.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Frampton, K. *Modern Architecture: A Critical History* / K. Frampton. – London: Thames & Hudson, 2020. – 736 p. – ISBN 9780500204443.
2. Валеев, Р. М. Индустриальное культурное наследие Казани в ракурсе аксиологического подхода / Р. М. Валеев, К. И. Мусина. – Текст : электронный // Вестник Кемеровского государственного университета культуры и искусств. – 2021. – № 55. – С. 79–84. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/industrialnoe-kulturnoe-nasledie-kazani-v-rakurse-aksiologicheskogo-podhoda>.
3. Рескин, Д. Семь светочей архитектуры / Д. Рескин ; перевод с английского М. А. Некрасова. – Санкт-Петербург : Азбука-классика, 2007. – 320 с. – ISBN 978-5-352-02208-5.
4. Иконников, А. В. Функция, форма, образ в архитектуре / А. В. Иконников. – Москва : Стройиздат, 1986. – 288 с.
5. From isolation to integration: A methodological review of adaptive reuse in industrial heritage buildings / Y. Ma, R. Roosli, Z. Cao [et al] // *Energy and Buildings*. – 2025. – Vol. 348. – Article 116474.
6. Karakoyun, B. *Westergasfabriek: A Case Study Into Adaptive Reuse of Post-industrial Heritage* / B. Karakoyun. – Delft: Delft University of Technology, 2024. – 36 p. – URL: <https://repository.tudelft.nl/record/uuid:f69f4ad1-7404-41c6-91eb-dc17e7017f5f>.
7. Muldoon-Smith, K., Moreton L., Loxley J. Lo-Fi Adaptive Re-Use in the Ouseburn Valley: What the Physical Materiality of Everyday Historical Industrial Buildings Can Tell Us About Sustaining Cultural and Creative Clusters / K. Muldoon-Smith, L. Moreton, J. Loxley // *Buildings*. – 2025. – Vol. 15, № 3. – Article 427.
8. Наумова, С. В. Творческие концепции ревитализации индустриальных объектов в контексте репрезентации времени / С. В. Наумова // *Архитектон: известия вузов*. – 2025. – № 4 (92). – URL: <https://scinetwork.ru/articles/58031>.
9. Пермитина, С. Ю. Разнообразие подходов к архитектурной адаптации и их влияние на среду города / С. Ю. Пермитина // *Наука, образование и экспериментальное проектирование. Труды МАРХИ : материалы международной научно-практической конференции : сборник статей, Москва, 08–12 апреля 2024 года ; Московский архитектурный институт*. – Москва, 2024. – С. 160–162. – EDN ZMTVBI.
10. Ляпцев, Н. Н., Наумова С. В. Городские общественные пространства: эволюция проблематики (современный проектный контекст) / Н. Н. Ляпцев, С. В. Наумова // *Архитектон: известия вузов*. – 2018. – № 3 (63). – С. 16.
11. Пепеляева, С. В. Объекты индустриального наследия как элементы геокультурного образа города / С. В. Пепеляева // *Архитектон: известия вузов*. – 2023. – № 4 (84). – DOI 10.47055/19904126_2023_4(84)_1. – EDN SJLWDL.
12. Чинь, Ф. Д. К. *Архитектура: форма, пространство, композиция* / Ф. Д. К. Чинь ; перевод с английского Е. Д. Фурсовой. – Москва : АСТ, 2019. – 432 с. – ISBN 978-5-17-154921-3.



BELAN Vladimir Sergeevich, postgraduate student of the chair of architecture, restoration and design¹, general director²; **KUROCHKINA Valentina Aleksandrovna**, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of architecture, restoration and design¹, associate professor³

CHALLENGES IN DEFINING THE AESTHETIC VALUE OF INDUSTRIAL ARCHITECTURE IN THE CONTEMPORARY CITY

¹Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba.

6, Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russia.

²LLC "ASK MOSPROJECT-1".

17, Butlerova St., Moscow, 117342, Russia.

Tel.: (495) 660-20-12 ext. 100; (964) 649-99-26; e-mail: vs.belan@mosproject-1.ru

³Moscow State University of Civil Engineering (National Research University).

26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russia.

Tel.: (977) 291-72-05, e-mail: kurochkina-va@rudn.ru

Key words: industrial architecture, revitalization, industrial heritage, aesthetic value, adaptive reuse.

This article examines the transformation of the aesthetic perception of industrial architecture from purely utilitarian objects to significant cultural values. It analyzes the historical foundations of the "aesthetics of honest design", the influence of 20th-century avant-garde movements, and contemporary practices of industrial zone revitalization. Particular attention is paid to the contradictions that arise during the preservation of industrial heritage and the influence of industrial forms on popular culture. The research methodology includes a comparative analysis of successful industrial site adaptation projects in Russia and abroad, as well as an assessment of the socioeconomic impact of these projects. The article substantiates the conclusion that the value of industrial architecture is multifaceted, encompassing historical, cultural, artistic, socioeconomic, and phenomenological aspects. The results of this study can be used in developing urban regeneration strategies for post-industrial cities and industrial heritage conservation zones.

REFERENCES

1. Frampton K. Modern Architecture: A Critical History. London: Thames & Hudson, 2020. 736 p. ISBN 9780500204443.
2. Valeev R. M., Musina K. I. Industrialnoe kulturnoe nasledie Kazani v rakurse aksiologicheskogo podkhoda [Industrial cultural heritage of Kazan through the lens of an axiological approach]. Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta kultury i iskusstv [Bulletin of Kemerovo State University of Culture and Arts]. 2021, № 55. P. 79–84. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/industrialnoe-kulturnoe-nasledie-kazani-v-rakurse-aksiologicheskogo-podkhoda>.
3. Ruskin J. Sem svetochey arkhitektury [Seven Lamps of Architecture]. perevod s angl. M. A. Nekrasov. Saint-Petersburg : Azbuka-klassika, 2007, 320 p. ISBN 978-5-352-02208-5.
4. Ikonnikov A. V. Funktsiya, forma, obraz v arkhitekture [Function, form, image in architecture]. Moscow, Stroyizdat, 1986, 288 p.
5. Ma Y., Roosli R., Cao Z. [et al.]. From isolation to integration: A methodological review of adaptive reuse in industrial heritage buildings. Energy and Buildings. 2025. Vol. 348. Article 116474.



6. Karakoyun B. Westergasfabriek: A Case Study Into Adaptive Reuse of Post-industrial Heritage. Delft: Delft University of Technology, 2024. 36 p. URL: <https://repository.tudelft.nl/record/uuid:f69f4ad1-7404-41c6-91eb-dc17e7017f5f>.
7. Muldoon-Smith K., Moreton L., Loxley J. Lo-Fi Adaptive Re-Use in the Ouseburn Valley: What the Physical Materiality of Everyday Historical Industrial Buildings Can Tell Us About Sustaining Cultural and Creative Clusters. *Buildings*. 2025. Vol. 15, № 3. Article 427.
8. Naumova S. V. Tvorcheskie kontseptsii revitalizatsii industrialnykh obektov v kontekste reprezentatsii vremeni [Creative concepts of industrial facilities revitalization in the context of time representation]. *Arkhitekton: izvestiya vuzov* [Architecton: Proceedings of Higher Education Institutions]. 2025, № 4 (92). URL: <https://scinetwork.ru/articles/58031>.
9. Permitina S. Yu. Raznoobrazie podkhodov k arkhitekturnoy adaptatsii i ikh vliyanie na sredu goroda [Diversity of approaches to architectural adaptation and their impact on urban environment]. *Nauka, obrazovanie i eksperimentalnoe proektirovanie. Trudy MARKhI: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: sbornik statey, 08-12 aprelya 2024 goda ; Moskovskiy arkhitekturny institut*. Moscow, 2024, P. 160–162. EDN ZMTVBI.
10. Lyaptsev N. N., Naumova S. V. Gorodskie obshchestvennye prostranstva: evolyutsiya problematiki (sovremennyy proektnyy kontekst) [Urban public spaces: evolution of the problematics (contemporary design context)]. *Arkhitekton: izvestiya vuzov* [Architecton: Proceedings of Higher Education Institutions]. 2018, № 3 (63), P. 16.
11. Pepelyaeva S. V. Obekty industrialnogo naslediya kak elementy geokulturnogo obraza goroda [Industrial heritage objects as elements of the geocultural image of the city]. *Arkhitekton: izvestiya vuzov* [Architecton: Proceedings of Higher Education Institutions]. 2023. № 4 (84). DOI 10.47055/19904126_2023_4 (84)_1. EDN SJIWDL.
12. Ching F. D. K. *Архитектура: форма, пространство, композиция* [Architecture: Form, Space, and Order]: perevod s angl. E. D. Fursova. Moscow, AST, 2019, 432 p. ISBN 978-5-17-154921-3.

© В. С. Белан, В. А. Курочкина, 2026

Получено: 31.03.2026 г.

**УДК 728.5 (664)**

DUTSEV Mikhail Viktorovich, doctor of architecture, professor of the chair of architecture, restoration and design of the Engineering Academy¹, holder of the chair of architectural environment design²; leading researcher, head of the department of problems of architecture theory³; MASSAQUOI Theresa Asiatu, postgraduate student of the chair of architecture, restoration and design¹

**CRITICAL REGIONALISM AND THE FORMATION OF RESILIENT
CULTURAL IDENTITY IN CONTEMPORARY HOTEL ARCHITECTURE
IN FREETOWN, SIERRA-LEONE**

¹Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University).
6, Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russia.

Tel.: (499) 936-87-87; e-mail: rudn@rudn.ru

²Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (831) 433-05-52; e-mail: nn2222@bk.ru

³Scientific Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Planning.

9, Dushinskaya St., Moscow, 111024, Russia.

Tel./fax: (499) 951-82-72; e-mail: niitag@yandex.ru

Tel.: (904) 535-80-24. e-mail: theresa_reb@yahoo.fr

Key words: critical regionalism, cultural identity, resilience, regional modernism, hotel architecture.

This article examines elements that reflect cultural identity, resilience and progress in contemporary hotel design in Freetown, Sierra-Leone. Recent hotel developments increasingly align with the city's capacity to project a culturally grounded and resilient architectural image. It focuses on how architectural design and organization influence the ability of hotels to reflect local identity, enhance resilience, and support sustainable tourism growth. The study employs a case study methodological approach to evaluate the current condition of hotel buildings by identifying critical themes and patterns in the development of hotels cultural identity. The research synthesizes design approaches that have emerged across hotels. The findings reveal that hotel architecture in Freetown predominantly draws on principles of critical regional modernism and experiential interior design, demonstrating how context-responsive architectural approaches can foster both cultural identity and resilience.

Introduction

Freetown, the capital of Sierra Leone, is undergoing a transformative journey from post-conflict recovery to becoming a burgeoning tourism destination. Central to this evolution is the hotel industry, where architecture serves as a tangible representation of the city's identity, resilience, and aspirations for progress. This paper explores how architectural design in Freetown's hotels reflects these themes and contributes to the broader narrative of the city's development.

This research examines the pivotal role of architectural design in the hotel industry of Freetown, Sierra Leone, as a medium for expressing cultural identity, fostering resilience, and promoting progress within the tourism sector. Resilience in architecture is a topic widely discussed across different global platforms [1]. Through an analysis of key hotel developments and architectural trends, the study highlights how design choices reflect the city's historical context, societal values, and aspirations for

sustainable growth. The global growth is widely communicated in theory by resilience, seen as a critical framework for architecture [2]. Despite the fact that adaptability and resilience are the core of regional responsive architecture, the identity hotel carries are of great importance to the city image [3].

The findings underscore the significance of integrating local heritage and modern design principles to create spaces that resonate with both visitors and the local community. Even though the world is seen as a global edifice, architecture needs to be understood and perceived as an identification to places [4].

Cultural identity through architectural design

There is a global drive for architecture to interpret identity through various cultures [5]. It is imminent to interpret spaces as a regional component to identity in architecture [6]. In Sierra Leone's architecture, designers interpret this by blending industrial materials like concrete and steel with local tactile finishes such as laterite stone, woven textiles, and indigenous timber. They also use motifs that are symbolic to the Sierra Leonean culture to express identity. Architecture in Freetown's hotel industry often incorporates elements that reflect the city's rich cultural heritage.

The "Country lodge hotel" adopts a contemporary international architectural language informed by critical regionalism and restrained material palettes. This global design framework is deliberately fostered to show local architectural expression through the integration of Sierra Leonean handcrafts, indigenous artworks, textures, and motifs within interior spaces (Figure 1, colour plate).

From a theoretical perspective, hotels in Freetown can be read through the lens of critical regionalism, where universal design principles are selectively adapted to local cultural conditions rather than imposed uniformly.

The result is an architectural environment that mediates between global architectural standards and local identity. This produces a culturally legible and place-responsive experience with an emphasis on experiential interiors (Figure 2, colour plate).

Holistically speaking modern cultural heritage are buildings that has an identity [7]. Cultural identity in relation to architectural design has been widely spoken of by african scholars that affirms traditional integration of culture to particular places [8], while contributing to wider discourse on the role of architecture in shaping resilient tourism-driven urban environments in cities of the global south.

Similarly, the "home suites hotel", is a modern hotel which is one of the city's branded boutique hotel, employs a contemporary architectural style characterized by refined materiality. While grounded in international modern design principles, clarity of form, minimal ornamentation, and functional efficiency the hotel strategically incorporates locally inspired aesthetics, textures, and artistic references that anchor the building within its cultural context. From an architectural theory perspective, this approach aligns with critical regionalism and experiential architecture, where global design languages are adapted to local narratives to produce spaces that are culturally legible.

The entrance serves as a "cultural threshold," where modern hospitality meets Sierra Leonean artistic identity. Elements of figurative Portraiture (Figure 3, colour plate) as a focal point of the entrance is a large-scale painting of a West African woman in traditional attire and headwrap. This serves as a "Cultural Signifier," immediately establishing a sense of place and local identity for arriving guests. Also, an Intricate metalwork (Gara-Inspired Patterns), a decorative pattern on the door features geometric,



interlacing metalwork. These patterns often echo the rhythmic, repetitive motifs found in Gara cloth (Sierra Leonean tie-dye) and traditional wood carvings.

The hotel's architecture thus operates as a mediating layer between global architectural frameworks and local identity [9], enhancing guest experience while functioning as a platform for cultural expression and continuity within Freetown's evolving urban landscape.

Resilience in Architectural Practices

When "resilience" is used for complex systems in the context of ecology, it refers to "the capacity of a system to absorb disturbance and reorganize while changing to retain essentially the same function, structure, identity, and feedbacks [10]. The scars of Sierra Leone's civil war and the disaster vulnerability challenges have left indelible marks on Freetown's urban landscape. In response, the hotel industry has adopted architectural practices that emphasize resilience and cultural identity.

Glass (2008) argues that architecture must proactively embed resilience into design by anticipating hazards, adapting buildings and urban systems to risk [11]. However, The country face the challenge of attending to hazards while simultaneously expressing an architectural language that reflects cultural resilience in its identity.

An approach, for hotels that similarly addresses regional concerns and cultural identity is key for the city's critical regional development. These developments signify a commitment to rebuilding and enhancing the city's infrastructure [12].

Moreover, initiatives like the Transform Freetown Agenda launched by the Freetown City Council aim to modernize heritage tourism and strengthen local capacities, it is therefore significant for Freetown to have an architectural language that reflects its local identity [13].

Looking forward, the hotel industry's architectural landscape in Freetown is poised for further innovation. The integration of sustainable design practices, such as the use of eco-friendly materials, that reflects a local cultural identity is becoming increasingly prevalent. Cultural buildings most times reflect the identity of a place by also adapting suitable design practices [14]. These efforts align with global trends towards sustainability and position Freetown as a forward-thinking destination in the tourism sector.

Additionally, the development of heritage tourism, particularly through connections with the African diaspora, presents opportunities for hotels to serve as cultural ambassadors. Hotels need an authentic identity (Figure 4, colour plate), mostly to be termed heritage buildings [15]. By offering experiences that connect visitors with the city's historical sites and narratives, hotels can play a crucial role in fostering a deeper understanding and appreciation of Freetown's heritage [16].

Despite many persistent challenges along the cultural identity and resilient framework for hotels, Freetown's hotels present a local identity that is embedded in the critical regionalist theory. An absence of a clearly articulated architectural and urban framework to guide coordinated hotel development in keeping a uniform identity throughout the urban landscape of Freetown is a challenge. In response, Architectural innovations are one of the best practices for enhancing tourism infrastructure [17].

Conclusion

In conclusion, the article observes a hierarchy of priorities and strategic design directions that align hotel architecture with broader urban objectives, emphasizing identity and resilience. These observations offer a practical framework for multi-level planning and design in Freetown's prime hotel corridor. Architecture in Freetown's

**К СТАТЬЕ М. В. ДУЦЕВА, Т. А. МАССАКОИ
«КРИТИЧЕСКИЙ РЕГИОНАЛИЗМ И ФОРМИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОЙ
КУЛЬТУРНОЙ ИДЕНТИЧНОСТИ В СОВРЕМЕННОЙ АРХИТЕКТУРЕ ОТЕЛЯ
ВО ФРИТАУНЕ, СЬЕРРА-ЛЕОНЕ»**



Figure 1: *a* – interior of hotel spaces with artworks, motifs specific to Sierra Leone; *b* – interior of hotel space without any cultural motifs

Рис. 1. *a* – интерьер гостиничных помещений с произведениями искусства, мотивами, характерными для Сьерра-Леоне; *б* – интерьер гостиничных помещений без каких-либо культурных мотивов



Figure 2. Elements of critical regionalism incorporated in Freetown's hotel architecture. Photograph of the interior of country lodge hotel

Рис. 2. Элементы критического регионализма, включенные в архитектуру отеля Фритауна. Фотография интерьера отеля *country lodge*



Figure 3. Home suites hotel, Freetown, original architect unknown
 Рис. 3. Отель *home suites*, Фритаун, первоначальный архитектор неизвестен



Figure 4. Photograph of the “Seen hotel project”, an ecological friendly design that provides a cultural identity for hotels in Freetown, Sierra Leone
 Рис. 4. Фотография «Проекта отеля *Seen*», экологически чистого дизайна, который обеспечивает культурную самобытность отелей во Фритауне, Сьерра-Леоне

hotel industry is more than a functional necessity; it is a powerful tool for reflecting the city's identity, demonstrating resilience, and driving progress. Through thoughtful design that honors cultural heritage and incorporates sustainable practices, the hotel sector makes a significant contribution to the broader goals of urban development and tourism in Freetown. As the city continues to evolve, the role of architecture in shaping its future remains integral to its success as a vibrant and dynamic destination.

REFERENCES

1. Campos P. Resilience, education and architecture: The proactive and "educational" dimensions of the spaces of formation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2020, Vol. 43, P. 101391.
2. Laboy M., Fannon D. Resilience theory and practice: a critical foundation for architecture. *ARCC Journal for Architectural Research*. 2016, Vol. 13, No. 1.
3. Abu-Hammad N. A., Abu-Hammad M. A. Sustainable design thinking: Adaptability, resilience, and productivity at the core of regionally responsive architecture. *Architecture Research*. 2017, Vol. 7, No. 3, P. 55–68.
4. Adam R. Identity and Identification: The Role of Architectural Identity in a Globalised World. *The Role of Place Identity in the Perception, Understanding and Design of Built Environments*. Bentham Science Publishers, 2012, P. 176–193.
5. Fantin S. Aboriginal identities in architecture. *Architecture Australia*. 2003, No. 3, P. 84–87.
6. Kistova A. V., Tamarovskaya A. N. Arkhitekturnoe prostranstvo kak faktor regionalnoy kulturnoy identichnosti [Architectural space as a factor of regional cultural identity]. *Zhurnal SFU. Gumanitarnye nauki [Journal of SFU. Humanities]*. Krasnoyarsk, 2015, № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/architectural-space-as-a-factor-of-regional-cultural-identity> (accessed: 23.03.2026).
7. Georgiadou Z., Frangou D., Marnellos D. Xenia Hotels in Greece: A Holistic Approach to Modern Cultural Heritage. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2015, Vol. 9, No. 2, P. 130–140.
8. Danjuma A. M., Mukhtar B. T., Ibrahim A. O., Baba F. Examination of Hausa Cultural Identity in Architectural Design. *PalArch's Journal of Archaeology of Egypt/Egyptology*. 2020, Vol. 17, No. 9, P. 1–12.
9. Morgado P. The Construction of Cultural Identity in Contemporary Architecture. *Architecture and Identity*. 2008, P. 165.
10. Liu D., Deters R., Zhang W. J. Architectural design for sustainability. *Enterprise Information Systems*. 2010, Vol. 4, No. 2, P. 137–152.
11. Glass J. Facing the future, designing resilience: an architectural perspective. *Hazards and the built environment: attaining built-in resilience*. London: Routledge, 2008, P. 172–188.
12. Chang T. C., Teo P. The shophouse hotel: Vernacular heritage in a creative city. *Urban Studies*. 2009, Vol. 46, No. 2, P. 341–367.
13. Transform Freetown Development Agenda. Freetown. URL: https://fcc.gov.sl/wp-content/uploads/2025/02/FINAL-Transform-Freetown_Transforming-Lives-Development-Agenda.pdf (accessed: 05.02.2026).
14. Moscatelli M. Cultural identity of places through a sustainable design approach of cultural buildings. The case of Riyadh. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022.
15. Xie P. F., Shi W. L. Authenticating a heritage hotel: co-creating a new identity. *Journal of Heritage Tourism*. 2019, Vol. 14, No. 1, P. 67–80.
16. Sarantakou E., Christidou A., Tsamos G. The Role of Heritage Hotels in the Identity of the Tourist Destination. *International Conference of the International Association for Cultural and Digital Tourism*. Springer Nature Switzerland, 2024.

17. Akromova M. Uluchshenie infrastruktury turizma za schet arkhitekturnykh innovatsii [Improving tourism infrastructure through architectural innovations]. Nauka i innovatsii [Science and Innovations]. 2024, Vol. 3, № 10, P. 176–183.

М. В. ДУЦЕВ, д-р архитектуры, проф. кафедры архитектуры, реставрации и дизайна Инженерной академии¹, зав. кафедрой дизайна архитектурной среды², гл. науч. сотрудник, зав. отделом проблем теории архитектуры³;
Т. А. МАССАКОИ, аспирант кафедры архитектуры, реставрации и дизайна¹

КРИТИЧЕСКИЙ РЕГИОНАЛИЗМ И ФОРМИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОЙ КУЛЬТУРНОЙ ИДЕНТИЧНОСТИ В СОВРЕМЕННОЙ АРХИТЕКТУРЕ ОТЕЛЕЙ ВО ФРИТАУНЕ, СЬЕРРА-ЛЕОНЕ

¹ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы».

Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

Тел: (499) 936-87-87; эл. почта: rudn@rudn.ru

²ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 433-05-52; эл. почта: nn2222@bk.ru

³Филиал ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» НИИТИАГ.

Россия, 111024, Москва, ул. Душинская, д. 9.

Тел./факс: (499) 951-82-72; эл. почта: niitag@yandex.ru

Тел.: (904) 535-80-24. эл. почта: theresa_reb@yahoo.fr

Ключевые слова: критический регионализм, культурная идентичность, устойчивость, региональный модернизм, архитектура отелей.

В этой статье рассматриваются элементы, отражающие культурную самобытность, устойчивость и прогресс в дизайне современных отелей во Фритауне Сьерра, Леоне. Недавние гостиничные проекты все больше соответствуют возможностям города создавать культурно обоснованный и устойчивый архитектурный образ. В нем основное внимание уделяется тому, как архитектурный дизайн и организация влияют на способность отелей отражать местную самобытность, повышать устойчивость и поддерживать устойчивый рост туризма. В исследовании используется методологический подход тематического исследования для оценки текущего состояния гостиничных зданий путем выявления важнейших тем и закономерностей в развитии культурной идентичности отелей. В исследовании синтезируются подходы к дизайну, которые появились в разных отелях. Полученные данные показывают, что архитектура отелей во Фритауне преимущественно опирается на принципы критического регионального модернизма и опытного дизайна интерьера, демонстрируя, как архитектурные подходы, учитывающие контекст, могут способствовать как культурной самобытности, так и устойчивости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кампос, П. Устойчивость, образование и архитектура: упреждающие и «образовательные» аспекты пространств формирования / П. Кампос // Международный журнал по снижению риска бедствий. – 2020. – № 1. – С. 101391.

2. Лабой, М. Теория устойчивости и практика: критическая основа архитектуры / М. Лабой, Д. Фэннон // Запрос ARCC Journal for Architectural Research. – 2016. – № 13 (1).



3. Хаммад, Н. А. Устойчивое дизайнерское мышление: адаптивность, устойчивость и продуктивность в основе архитектуры, учитывающей региональные особенности / Н. А. Хаммад, М. А. Хаммад // *Architecture Research*. – 2017. – № 7 (3). – С. 55–68.
4. Адам, Р. Идентичность и отождествление: роль архитектурной идентичности в глобализированном мире. Роль идентичности места в восприятии, понимании и проектировании застроенной среды / Р. Адам // *Бентамская наука*. – 2012. – № 1. – С. 176–193.
5. Фантин, С. Идентичность аборигенов в архитектуре: как архитектура может интерпретировать культурную идентичность? / С. Фантин // *Архитектура Австралии*. – 2003. – № 7 (3). – С. 84–87.
6. Кистова, А. В. Архитектурное пространство как фактор региональной культурной идентичности / А. В. Кистова, А. Н. Тамаровская. – Текст : электронный // *Журнал СФУ. Гуманитарные науки*. – 2015. – № 4. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/architectural-space-as-a-factor-of-regional-cultural-identity> (дата обращения : 23.03.2026).
7. Георгиаду, Z. Отели Xenia в Греции: целостный подход к современному культурному наследию / Z. Георгиаду, Д. Франгу, Д. Марнеллос // *Журнал гражданского строительства и архитектуры*. – 2015. – Vol. 9 (2). – С. 130–140.
8. Данджума, А. М. Изучение культурной идентичности хауса в архитектурном дизайне / А. М. Данджума, Б. Т. Мухтар, А. О. Ибрагим, Ф. Баба // *Журнал археологии Египта / Египтология издательства PalArch*. – 2020. – Vol. 17 (9). – С. 1–12.
9. Моргадо, П. Построение культурной идентичности в современной архитектуре / П. Моргадо // *Архитектура и идентичность*. – 2008. – № 9. – 165 с.
10. Лю, Д. Архитектурный дизайн для устойчивости / Д. Лю, Р. Детерс, В. Дж. Чжан // *Корпоративные информационные системы*. – 2010. – Vol. 4 (2). – С. 137–152.
11. Гласс, Дж. Лицом к будущему, проектируя устойчивость: архитектурная перспектива / Дж. Гласс // *Опасности и искусственная среда: достижение встроенной устойчивости*. – Лондон : Рутледж, 2008. – С. 172–188.
12. Чанг, Т. К. Отель shophouse: народное наследие в креативном городе / Т. К. Чанг, П. Тео // *Урбанистические исследования*. – 2009. – № 7 (3). – С. 341–367.
13. Повестка дня развития Фритауна / Фритаун. – URL: https://fcc.gov.sl/wp-content/uploads/2025/02/FINAL-Transform-Freetown_Transforming-Lives-Development-Agenda.pdf (дата обращения : 05.02.2026). – Текст : электронный.
14. Москателли, М. Культурная самобытность мест благодаря устойчивому подходу к проектированию культурных зданий, случай Эр-Рияда / М. Москателли // *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*. – 2022.
15. Се, П. Ф. Аутентификация отеля наследия: совместное создание новой идентичности / П. Ф. Се, В. Л. Ши // *Журнал туризма наследия*. – 2019. – Vol. 14 (1). – С. 67–80.
16. Сарантаку, Э. Роль отелей наследия в формировании идентичности туристического направления: тематические исследования на Санторини (Тира), Магнезии и Янине / Э. Сарантаку, А. Кристиду, Г. Цамос // *Международная конференция Международной ассоциации культурного и цифрового туризма*. – Springer Nature Switzerland, 2024.
17. Акромова, М. Улучшение инфраструктуры туризма за счет архитектурных инноваций / М. Акромова // *Наука и инновации*. – 2024. – Vol. 3 (10). – С. 176–183.

© М. В. Дуцев, Т. А. Массакон, 2026

Получено: 31.03.2026 г.



УДК 72.01:004.8(64)

**М. ЖАБЕР, аспирант кафедры архитектурного проектирования;
А. Л. ГЕЛЬФОНД, д-р архитектуры, проф., академик РААСН, зав. кафедрой
архитектурного проектирования**

ГЕНОМ МАРОККАНСКОГО ЖИЛИЩА: АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ КОДИРОВАНИЕ И ГЕНЕРАТИВНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-17-83; эл. почта: jaberlana123@gmail.com

Ключевые слова: геном марокканского жилища; пространственный синтаксис; порождающие грамматики; архитектурная морфология.

Статья представляет формализацию генома марокканского жилища. Исследование интегрирует анализ пространственной организации с порождающими грамматиками из медины Марракеша и медины Феса. На основе 17000 исторических планов разработаны модели синтеза архитектурных конфигураций. Калибровка по двум региональным вариантам и четырем историческим периодам показывает 81-процентное соответствие историческим ограничениям и статистически неотличимые распределения пространственных характеристик.

Введение

Жилищный геном отражает эволюционную систему архитектурных форм, управляемую закодированными культурными правилами. Генотип содержит невидимый набор норм, фенотип воплощает их в материальной форме. Архитектурный геном передает формальную логику поколениям строителей, которые, не обладая формальным образованием, работали в рамках глубоко интериоризованных систем правил.

Марокко предоставляет исключительный пример. Традиционное жилище кодифицирует юридические, религиозные и климатические требования исламской культуры. Правила, основанные на исламском праве и обычной практике, запрещают прямые линии видимости между улицей и интерьером, требуют иерархии приватности и ставят центральный дворик основой системы. Эти невидимые топологические правила произвели одну из наиболее последовательных архитектурных традиций, сохранявшихся более тысячелетия.

Компьютерные методы позволяют формализовать этот геном и реактивировать его в современной практике. Предыдущие исследования установили правила конкретных типологий и развили методы для анализа пространственных конфигураций. Однако интеграция, закодировавшая бы марокканский геном в модели для синтеза культурно валидных типологий различных эпох и регионов, остается открытой задачей.

Исследование предлагает четыре результата: формализацию генома через пространственный анализ и правила, вычислительный конвейер синтеза архитектурных планов, калибровку моделей по историческим периодам и региональным вариантам, валидацию против исторических данных с использованием статистических методов [1–22].

Материалы и методы

1.1. Исходные данные

Исследование опирается на три комплементарных источника.

Первый набор, *ResPlan*, содержит 17000 аннотированных планов жилых домов в геометрическом формате (векторизованные *SVG/PNG*) и графовом формате (*JSON*). Каждый план включает информацию о типах помещений, расположении стен, дверей и окон, а также граф смежности помещений. Подмножество из 2340 планов с проверенными конфигурациями центральных дворов было выбрано для специализированного анализа генома.

Второй источник, *MLStructFP* (версия 0.7.4), предоставляет крупномасштабные изображения планов с аннотациями *JSON*, определяющими полигоны стен, границы перекрытий и пространственные метаданные. Эта база данных обеспечивает геометрическое разнообразие и включение информации о несущих конструкциях.

Третий источник включает архивные планы и морфологические исследования медины Марракеша (около 120 документированных жилищ в квартале Заоуиат Лакхдара) и медины Феса (87 документированных жилищ), а также корпус из 43 жилищ южного Марокко из долин Драа и Дадес.

1.2. Основы анализа

Пространственный синтаксис используется как основная методология для количественного описания архитектурных конфигураций. Метод конвертирует планы этажей в графы оправданной проницаемости (*J*-графы), в которых каждое помещение представляется узлом на уровне, соответствующем его удалению от входа. Три основные метрики вычисляются для каждого помещения:

Angular Segment Integration (ASI) измеряет центральность пространства. Высокие значения указывают на ядро системы (центральный дворик).

Topological Depth (TD) подсчитывает пороговые границы от входа к помещению. Традиционные жилища имеют глубину 4,8–5,2, создавая приватность.

Normalized Angular Choice (NACH) выявляет пространства движения. Низкие значения в периферийных помещениях указывают на их разделение от потоков движения.

Порождающие грамматики определяют правила построения жилища через серию последовательных операций. Марокканское жилище генерируется пятью правилами: инициализация участка с определением ориентации, размещение центрального двора параметризованного размера, создание кольцевых зон помещений (логжия, байт), вставка входной переходной зоны, обеспечивающей приватность. Эти правила параметризованы размерами и соотношениями, которые варьируются в определенных допустимых диапазонах.

1.3. Обработка данных и синтез моделей

Исходные планы подвергаются четырехэтапной обработке: конвертация в векторную геометрию, представление помещений в виде графа смежности, извлечение характеристик генома (*ASI*, *TD*, соотношения размеров), классификация по региону и периоду.

На основе обработанных данных разработаны вычислительные модели для синтеза новых планов. Процесс состоит из трех последовательных этапов. На первом этапе модель генерирует граф структуру помещений, представляющую топологические отношения между помещениями в соответствии с параметрами



целевого генома. На втором этапе граф трансформируется в двумерный план этажа через итеративный процесс, который постепенно уточняет геометрические характеристики и размещение помещений. На третьем этапе сгенерированный план проверяется и корректируется в соответствии с правилами порождающей грамматики.

1.4. Калибровка и валидация

Калибровка обеспечивает соответствие результатов историческим эталонам и правилам грамматики. Система штрафует нарушения ограничений: пропорция двора вне диапазона от 1,0 до 1,30, отсутствие входной переходной зоны, неправильные соотношения размеров колец помещений. Одновременно система минимизирует расхождения в пространственно-синтаксических характеристиках между генерируемыми планами и историческими образцами.

Итоговая калибровка использует комбинированный критерий, уравнивающий штрафы за нарушения ограничений грамматики и расхождения от исторических эталонов. Модель оптимизируется итеративно до достижения заданного уровня соответствия.

Качество разработанных моделей оценено через две системы метрик. Первая система использует стандартные вычислительные метрики сравнения изображений (*Fréchet Inception Distance*, *Inception Score*, *Structural Similarity Index Measure*), вычисляемые против исторического корпуса. Вторая система вычисляет пространственно-синтаксические характеристики сгенерированных планов и сравнивает их с историческими распределениями, используя тесты Колмогорова-Смирнова.

Результаты исследования

2.1. Формализация марокканского жилищного генома

2.1.1. Граф оправданной проницаемости и интеграционные сигнатуры

Анализ 207 исторических примеров выявляет последовательную сигнатуру интеграции, представляющую числовой отпечаток марокканского жилищного генома. Центральный дворик (Сахн) постоянно достигает наиболее высокого значения *ASI* в системе со средним значением $0,93 \pm 0,06$, что подтверждает его роль пространственного аттрактора, вокруг которого организованы все прочие помещения архитектурной системы.

Входная переходная зона (Сифон), служащая обязательным барьером между общественной улицей и приватным интерьером дома, показывает характеристическое низкое значение *ASI* $0,31 \pm 0,08$, отражая ее функцию защиты приватности и отделения публичного пространства.

Первичные жилые помещения достигают промежуточных значений интеграции $0,43 \pm 0,09$, обеспечивая доступность с центрального двора при одновременном удалении от общественного входа и уличной сети.

Топологическая глубина от входа к первичной спальне составляет $5,2 \pm 0,7$ пороговых переходов, что в два раза превышает глубину современных европейских апартаментов (типично от 2,1 до 2,8 переходов) и демонстрирует систематическое обеспечение приватности через пространственное разделение и последовательность пороговых границ (рис. 1).

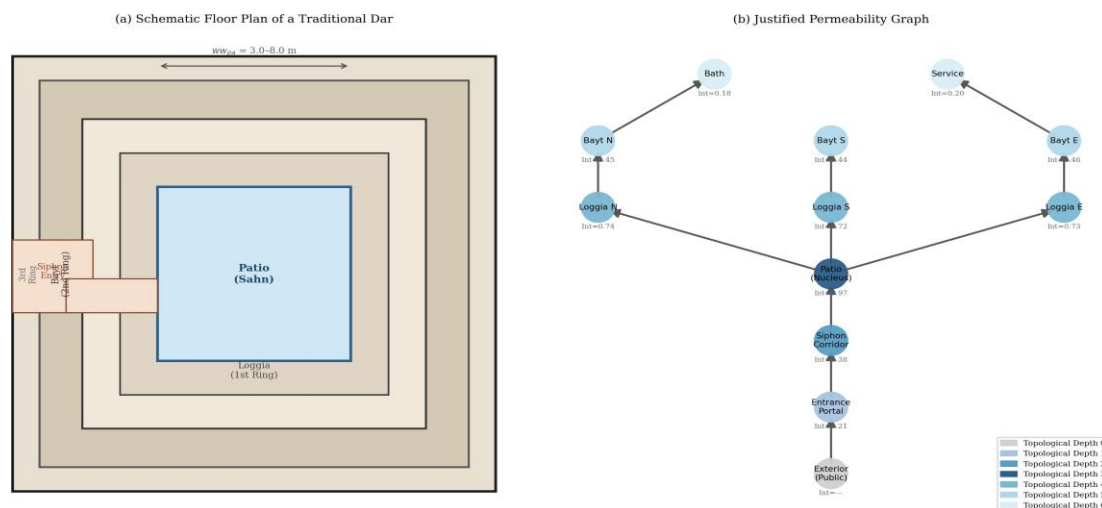


Рис. 1. Граф оправданной проницаемости: *a* – план с трехкольцевой структурой; *b* – граф с аннотированными значениями интеграции
(Justified Permeability Graph: *a* – three-ring structure; *b* – graph with integration values)

2.1.2. Правила порождающей грамматики

Марокканское жилище порождается пятью правилами: инициализация участка, размещение центрального двора (3–8 м, 15–35 % площади), создание переходной зоны (логжия, глубина 0,17–0,31 от ширины двора), генерация первичных помещений (байт) вокруг логжии, вставка входной зоны *L* или *Z*-формы без прямых видимостей к дворику (рис 2).

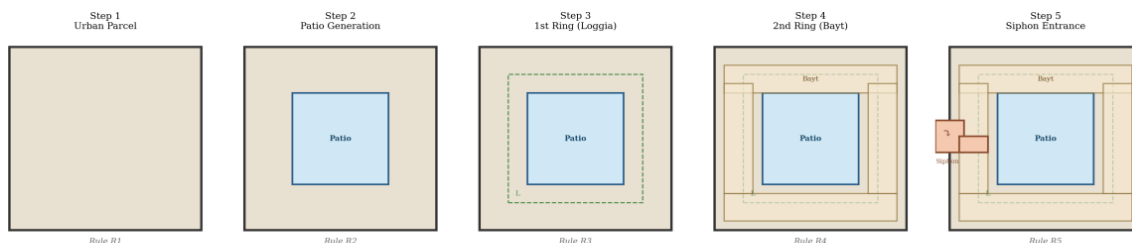


Fig. 2 — Shape Grammar Generative Sequence for the Moroccan Patio House (Dar)

Рис. 2. Последовательность применения правил порождающей грамматики от инициализации участка к завершеному жилищу

2.2. Региональные и исторические варианты

2.2.1. Региональная дихотомия

Южный геном (*Ksour/Kasbah*) развился в условиях экстремальной жары с летними температурами от 38 до 42 градусов Цельсия и историческими угрозами безопасности. Конструкция использует трамбованную землю (писе) и глиняные кирпичи с высокой тепловой инерцией, обеспечивающей задержку от 8 до 12 часов между пиком наружной и внутренней температуры. Минимальные наружные окна на уровне земли предотвращают перегрев, центральный дворик функционирует как пассивный тепловой регулятор и микроклиматический узел.

Северный геном (*Dar/Riad*) отражает средиземноморский климат с летними температурами от 28 до 34 градусов Цельсия и многовековой андалузский

культурный диалог, начавшийся после изгнания мусульманских ремесленников из Испании в 1492 году. Материальная база переходит к камню, извести и побелке с высокой солнечной отражательной способностью от 0,75 до 0,85. Центральный дворик становится эстетическим и социальным центром, украшенным геометрической плиточной мозаикой (зеллидж), резными потолками из кедра (арз) и орнаментальной штукатуркой. Кровельные террасы становятся активными социальными пространствами для собраний и ночного сна (рис. 3).

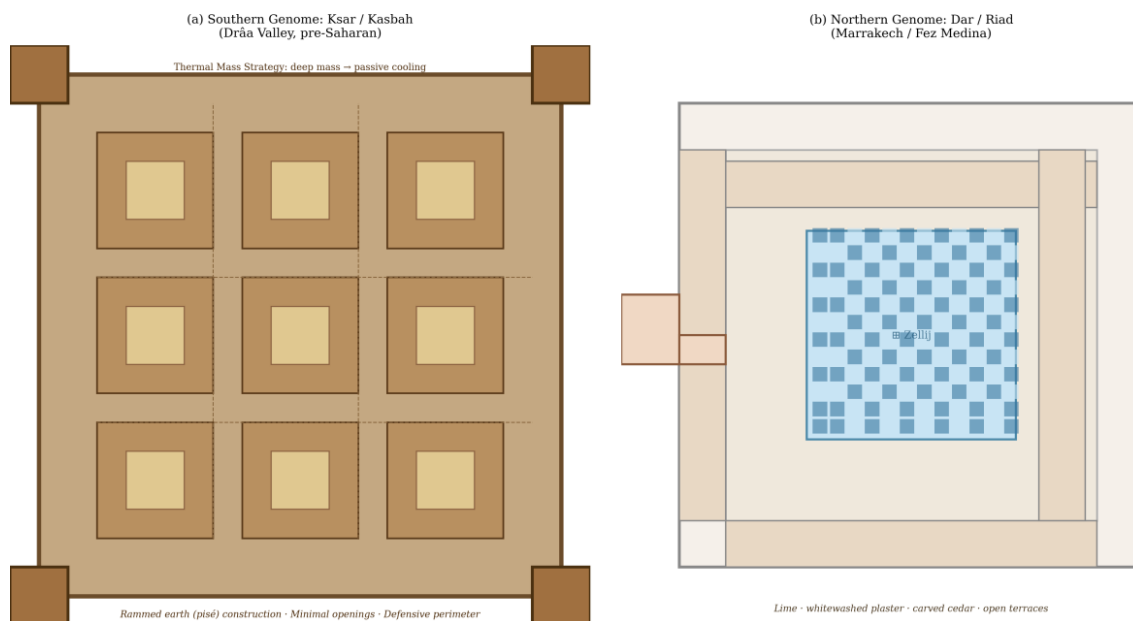


Рис. 3. Сравнение Южного и Северного региональных геномов марокканского жилища

2.2.2. Историческая эволюция

Геном прошел четыре исторических трансформации. Средневековая Медина (до 1900 г.) сохраняет классические правила с максимальной глубиной. Колониальный период (1912–1940 гг.) встраивает традиционные жилища в европейские ортогональные сетки, упраздняя органическую гибкость. Сетка Экошара (1950-е гг.) представляет рационалистское упрощение со стандартизированными 64 м² единицами в L-образном расположении вокруг маленького 5×5 м дворика. Типология R+2 (после 1964 г.) мутировала вертикально, заменяя дворик на центральный переход и железобетон на традиционные материалы, при сохранении поведенческих паттернов приватности (рис. 4).

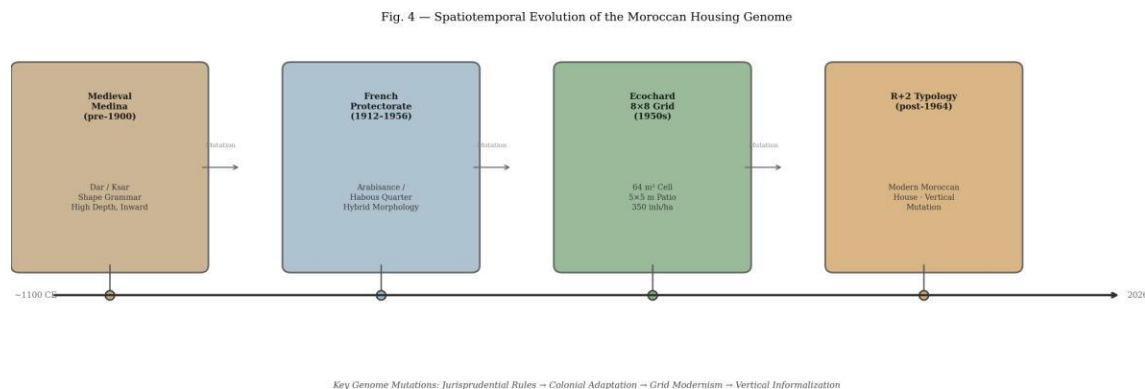


Рис. 4. Эволюция марокканского жилищного генома через четыре исторических периода от медины к современности

2.3. Синтез, калибровка и валидация

Разработанные модели генерируют новые планы в три этапа.

На первом этапе модель создает графовую структуру помещений в соответствии с параметрами целевого генома и историческим периодом. На втором этапе граф трансформируется в двумерный план этажа через итеративный процесс денойзирования, уточняющий геометрические характеристики, размещение стен и расположение помещений. На третьем этапе сгенерированный план проверяется и корректируется в соответствии с правилами порождающей грамматики (рис. 5).

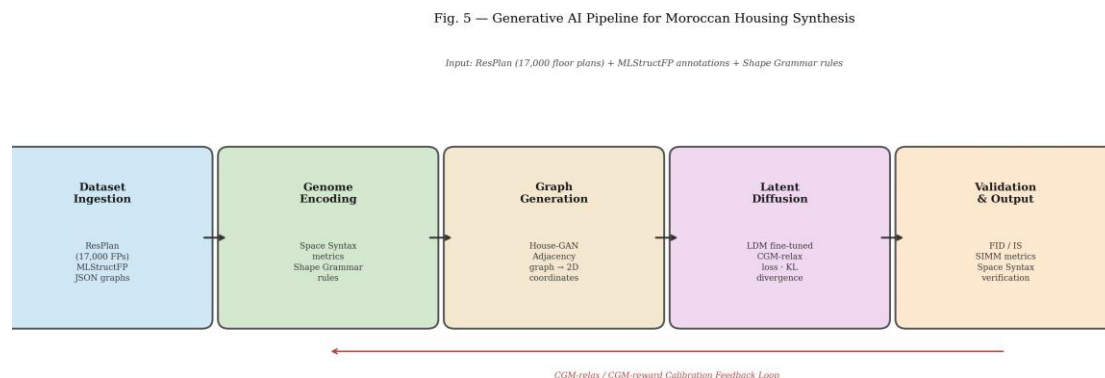


Рис. 5. Конвейер синтеза марокканского жилища: от входных данных через генерацию графа к синтезу плана и калибровке

Результаты показывают, что калиброванные модели достигают 81 % соответствия правилам порождающей грамматики, что представляет улучшение на 93 % относительно некалиброванного варианта. Пространственные характеристики сгенерированных планов находятся в пределах 2,1 % от исторических эталонов для средневековых жилищ, 1,9 % для южных, 1,5 % для периода Экошара и 2,0 % для типологии R+2 (рис. 6).

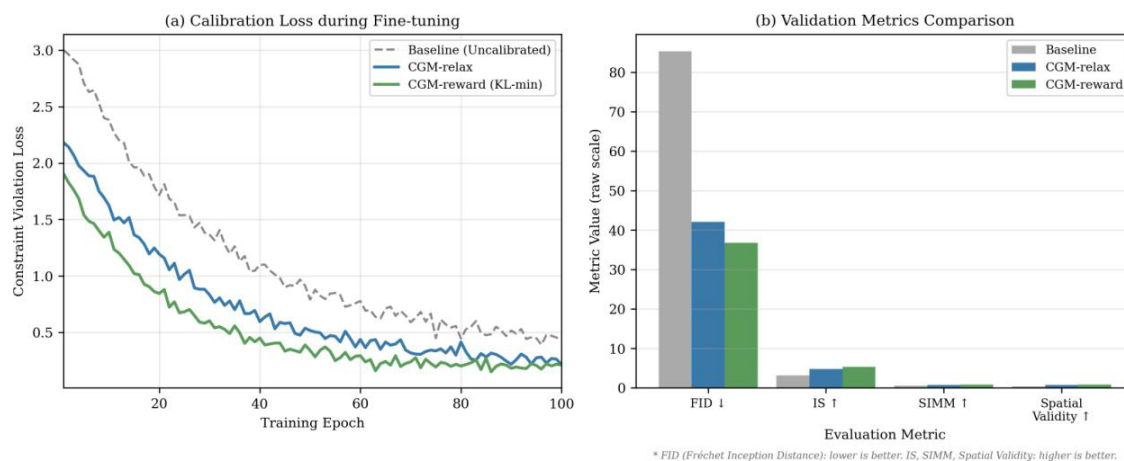


Рис. 6. Результаты калибровки: динамика улучшения соответствия ограничениям и производительности на валидационной выборке

Статистическое тестирование Колмогорова-Смирнова подтверждает, что распределения *Angular Segment Integration* в сгенерированных планах статистически неотличимы от исторических распределений для трех из четырех исторических периодов на уровне значимости 0,05. Только типология R+2 показывает маргинально значимую разницу на уровне 0,048, объясняемую большей гетерогенностью практик современного строительства (рис. 7, 8).

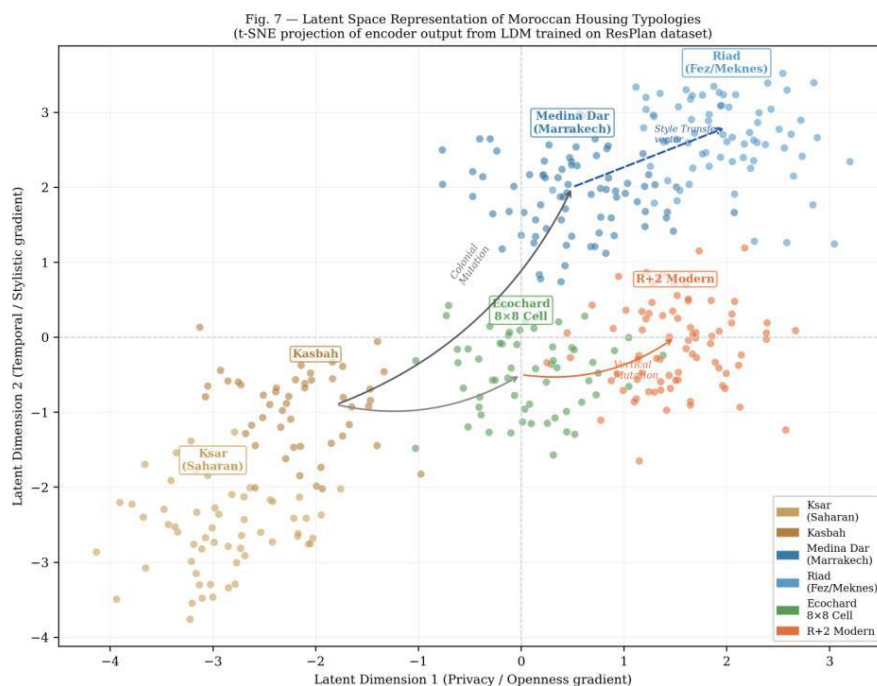


Рис. 7. Скрытое пространство архитектурных типологий, показывающее различные области кластеров для каждого исторического периода с векторами мутаций

Fig. 8 — Space Syntax Metrics across Four Moroccan Housing Typologies

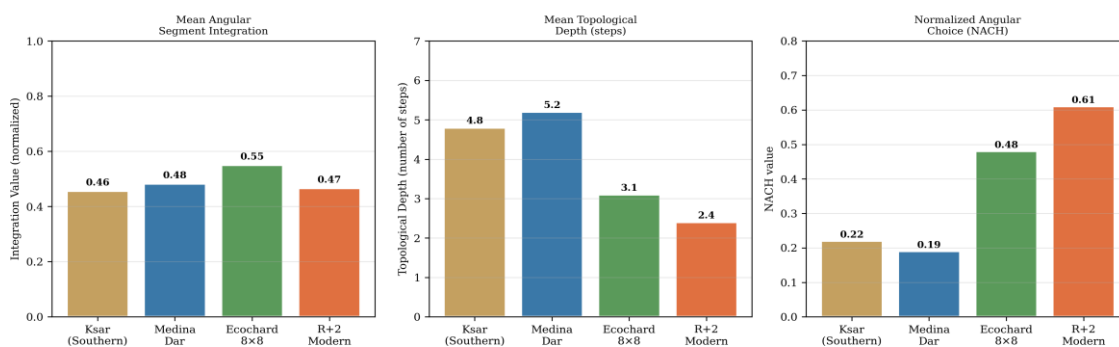


Рис. 8. Сравнение пространственно-синтаксических характеристик сгенерированных планов с историческими эталонами по четырем типологиям

Обсуждение

Исследование показывает, что марокканский геном может быть формализован как система параметрических правил и реализован через вычислительные модели. Геном не является единым образцом, но семейством связанных вариантов, сохраняющих инвариантное ядро (центральный дворик, пороги приватности, входная зона) при вариативности в материалах, размерах и организации по регионам и эпохам.

Практический результат: архитекторы могут использовать исторический геном для современного проектирования; специалисты по наследию могут генерировать варианты восстановления поврежденных зданий.

Заключение

Исследование достигло четырех основных результатов.

Во-первых, предложена строгая математическая формализация марокканского жилищного генома, охватывающая четыре исторических периода и два региональных варианта, предоставляющая первую комплексную параметрическую спецификацию геномов Экошара 8×8 и R+2.

Во-вторых, разработаны вычислительные модели синтеза архитектурных планов, которые достигают 81 % соответствия историческим правилам порождающей грамматики, что на 93 % превышает производительность некалиброванных моделей.

В-третьих, установлено через статистическое тестирование, что пространственные характеристики (*Angular Segment Integration*, *Topological Depth*) сгенерированных планов статистически соответствуют историческим образцам для трех из четырех исторических типологий на уровне доверия 95 %.

В-четвертых, создано представление архитектурного пространства, позволяющее управляемый переход между историческими периодами и региональными вариантами и контекстно-дифференцированное создание новых типологий.

Марокканский геном представляет действующую систему правил для генерации культурно обоснованных и геометрически валидных решений. По мере ускорения урбанизации способность использовать региональные архитектурные знания в вычислительных инструментах становится критической для создания эффективной, аутентичной и качественной жилой среды.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Estaji H. A Review of Space Syntax. *International Journal of Contemporary Architecture*. 2017. Vol. 4, № 2. P. 11–18.
2. Hillier B., Hanson J. *The Social Logic of Space*. Cambridge: Cambridge University Press, 1984. 281 p.
3. Yamu C., Van Nes A., Garau, C. Bill Hillier's Legacy: Space Syntax – A Synopsis of Basic Concepts, Measures, and Empirical Application. *Sustainability*, 2021, Vol. 13, № 6. P. 3394.
4. Duarte J. P., Ducla-Soares G., Caldas L. An Urban Grammar for the Medina of Marrakech. *Proceedings of the 11th eCAADe Conference*. 2008. P. 489–497.
5. Hakim B. S. *Mediterranean Urban and Building Codes*. *Urban Design International*. 2008. Vol. 13, № 1, P. 21–40.
6. Duarte J. P., Rocha J., Soares G. Unveiling the Structure of the Marrakech Medina. *AI EDAM*. 2007. Vol. 21, № 4. P. 317–349.
7. Benkirane, Z., Naceur M. The Patio House Typology and Modern Architecture. *AMJAU*. 2021. Vol. 5, № 1, P. 12–26.
8. Navarro J. F., Jiménez P. Toward a History of the Modern Moroccan House. *Journal of the History of Ideas Blog*. 2021.
9. Bianca S. Tradition and Sustainability in Vernacular Architecture. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, № 2. P. 684.
10. Goodman G. *A Machine Learning Approach to Artificial Floorplan Generation*: thesis. Lexington: University of Kentucky, 2021. 98 p.
11. Kim D. *Latent Morphologies*: thesis. Cambridge: Harvard Graduate School of Design, 2023. 142 p.
12. Johanes M. *Machine Understanding of Architectural Space*: thesis. Lausanne: EPFL, 2023. 198 p.
13. Hosseini M., [et al.] *Generative AI for Architectural Design*. arXiv preprint. 2024. arXiv: 2404.01335. DOI 10.48550/arXiv.2404.01335.
14. Solihin W., [et al.] *A State-of-Art Survey on Generative AI Techniques for Floor Planning*. *GenAI+HCI Workshop*. 2025.
15. Liu R., [et al.] *Research Progress and Frontier Trends in Generative AI. Buildings*. 2026. Vol. 16, № 2, P. 388.
16. Luo, Y., [et al.] *Evaluating Daylight Performance of AI-Generated Housing Plans*. *AI EDAM*. 2024. Vol. 38.
17. Chaillou S., [et al.] *Calibrating Generative Models*. arXiv preprint. 2024. arXiv: 2510.10020. DOI 10.48550/arXiv.2510.10020.
18. Muñoz-Moreno R., [et al.] *Housing and Local Identity. Housing in Morocco*. Cambridge: Open Book Publishers, 2024. DOI 10.11647/obp.0460.
19. Blain C. *The Ecochard Grid and Moroccan Mass Housing*. Team 10 Online. 2008. P. 1–14.
20. Pastel R., [et al.] *Automatic Generation of Architecture Façade*. *ResearchGate*. 2022.
21. Peng H., [et al.] *Deep Learning in Historical Architecture Remote Sensing*. *ResearchGate*. 2022.
22. Witte F., [et al.] *Architectural Generative Model Evaluation Methods*. *CAADRIA*. 2024. P. 438–447.

**JABER Mohammed, postgraduate student of the chair of architectural design;
GELFOND Anna Lazarevna, doctor of architecture, professor, academician of
RAACS, holder of the chair of architectural design**

**MOROCCAN HOUSING GENOME: ALGORITHMIC ENCODING AND
GENERATIVE IMPLEMENTATION**



Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (831) 430-17-83; e-mail: jaberlama123@gmail.com

Key words: Moroccan housing genome; Space Syntax; generative grammars; architectural morphology; spatiotemporal calibration.

This paper formalizes and computationally implements the genome of Moroccan domestic architecture. The research integrates spatial organization analysis using Space Syntax metrics (Angular Segment Integration, Topological Depth, Normalized Angular Choice) with generative grammars derived from fieldwork in Marrakech and Fez medinas. Computational models for architectural configuration synthesis were developed using data from 17,000 historical floor plans. Calibration was performed across two regional variants (Southern and Northern genomes) and four historical periods (Medieval Medina, Colonial, Ecochard 8×8 grid, R+2 Modern). Results demonstrate 81 percent conformity with historical constraints and statistically indistinguishable distributions of key spatial characteristics for three of the four historical periods.

© М. Жабер, А. Л. Гельфонд, 2026

Получено: 08.05.2026 г.



УДК 72.02(470.53)

С. В. МАРТЫНОВ, магистрант кафедры дизайна архитектурной среды¹;
М. В. ГЛАДЫШЕВА, доц. кафедры архитектуры и дизайна²;
И. В. ЕРОФЕЕВА, доц. кафедры основ архитектуры и художественных коммуникаций³

КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИИ НА ПРИМЕРЕ Г. ПЕРМЬ

¹ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

²ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева» («МГУ им. Н. П. Огарева»).

Россия, 430000, г. Саранск, ул. Советская, д. 24.

Тел.: (951) 055-86-80; эл. почта: nikel_its_me@mail.ru

³ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Ключевые слова: благоустройство, развитие территории, проект, туристический потенциал.

Статья рассматривает концепцию комплексного развития территории Камской долины в г. Пермь. Предложен подход, основанный на сочетании ландшафтно-инженерных мероприятий и многофункционального зонирования, обеспечивающего интеграцию жилых, рекреационных и производственно-технологических функций. На основе предпроектного анализа обоснована планировочная модель с системой общественных пространств у воды, бульварами и экотропами, малоэтажной застройкой, спортивно-событийными зонами, лесопарковым массивом и технопарком, отделенными зелеными буферными зонами. Показано, что формирование рекреационно-экологического каркаса на базе инженерной защиты повышает устойчивость территории и снижает вероятность экологических и функционально-пространственных конфликтов.

Введение

Концепция развития территории в районе Камской долины (г. Пермь) ориентирована на формирование многофункционального городского района, сочетающего жилую застройку, производственно-технологический кластер, рекреационные пространства и развитую социально-культурную инфраструктуру. Базовой идеей проекта является создание экологически устойчивой среды на подтопляемых участках за счет инженерно-ландшафтного комплекса, включающего систему искусственных водоемов, дренажные решения и мероприятия по рекультивации. Предлагаемые меры направлены на снижение гидрологических рисков, повышение качества городской среды и формирование новой точки притяжения в структуре города.

Проектная модель предполагает функциональное зонирование территории и формирование взаимосвязанной системы общественных и природных пространств. В структуру включены парковая и событийная зона с аттракционами, спортивный кластер, общественные пространства у водоема, малоэтажная жилая застройка, технопарк с рекреационными элементами для

сотрудников, лесопарковая зона и блок социальной инфраструктуры (в том числе поликлиника). Все функциональные компоненты объединяются сетью бульваров, экотроп и транспортных связей, что в совокупности задает сценарий комплексного освоения пригородной территории на принципах устойчивого управления природными ресурсами, пространственной интеграции промышленности и рекреации и опоры на локальные ландшафтные характеристики [1].

Проблематика развития территории Камской долины определяется совокупностью природно-инженерных и градостроительных ограничений, требующих комплексного проектного и управленческого решения [2]. Ключевым фактором выступает высокая подтопляемость территории, обуславливающая необходимость системной работы с режимом грунтовых вод, устройством дренажной инфраструктуры и защитой уязвимых участков при одновременном сохранении и поддержании природных экосистем.

Существенным вызовом является фрагментарность сложившейся застройки и недостаточная функционально-планировочная определенность территории. Это требует формирования ясной пространственной структуры через функциональное зонирование, разведение производственных и общественно-жилых зон, а также проектирование шумозащитных и озелененных буферов как элементов санитарно-экологического каркаса [3].

Отдельная группа проблем связана с дефицитом качественных общественных пространств и рекреационной инфраструктуры, а также с недостаточной связностью жилых кварталов с набережной и природным каркасом [4]. В данных условиях актуализируется задача формирования непрерывной сети бульваров, пешеходных маршрутов и прибрежных зон отдыха, обеспечивающих доступность воды и интеграцию природных компонентов в повседневные сценарии использования территории.

Наконец, планируемое размещение технопарка и производственно-технологических кластеров актуализирует риск конфликтов между промышленным развитием и экологическими требованиями [5]. Минимизация негативного воздействия предполагает применение наилучших доступных технологий, специальные планировочные решения и организацию постоянного экологического мониторинга как условия долгосрочной устойчивости проекта.

Материалы и методы

Проектируемая территория расположена в г. Перми в районе пересечения ул. Спешилова и ул. Торфяной (в соответствии со схемой расположения участка на плане местности) (рис. 1). Рассматриваемый участок занимает северо-восточную часть территории Камской долины и локализован восточнее ул. Спешилова. В рамках предпроектного анализа выполнена оценка ландшафтной организации и экологического состояния, показавшая необходимость комплексного подхода с учетом сочетания природных и антропогенных факторов.

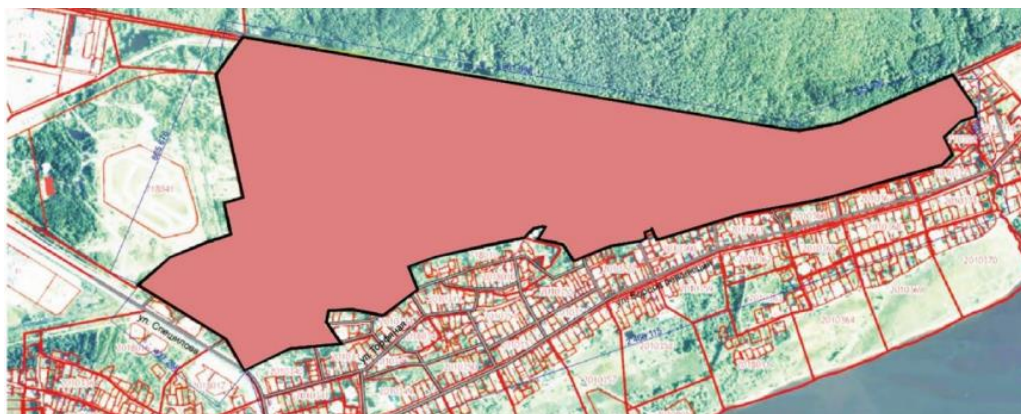


Рис. 1. Границы проектируемой территории в г. Пермь

Ключевым природным ограничением является подтопляемость, что требует уточнения гидрогеологических параметров, включая уровни грунтовых вод, характеристики грунтов, а также инвентаризацию растительного покрова и существующих экосистем. В качестве базового принципа принята модель устойчивого управления природными ресурсами, ориентированная на снижение ущерба от подтоплений и повышение качества городской среды [5]. На основании анализа карт распределения грунтовых вод и зон подтопления предложено формирование искусственного водоема, выполняющего функции аккумуляции поверхностного стока и поддержания биоразнообразия [6]. Питание водоема предполагается за счет водного объекта-отстойника, расположенного в северной, более высокой части территории и функционирующего как элемент локальной системы водоподготовки; далее очищенные воды планируется направлять по водоотводящему каналу в юго-восточном направлении с последующим выпуском в р. Каму.

Результаты исследования и их обсуждение

Постановка проектных работ предусматривала два этапа. На первом этапе разрабатывались базовые концептуальные решения: предпроектный анализ территории (включая выявление культурно-исторических предпосылок и смысловых доминант), формирование функционального зонирования, подбор отечественных и зарубежных аналогов, разработка обобщенной концепции освоения [7]. На втором этапе выполнялась детализация утвержденного варианта: комплексная проработка планировочной структуры, доминантных объемов и общественных пространств, а также подбор архитектурно-дизайнерских решений элементов благоустройства.

Камская долина представляет собой микрорайон в составе Ленинского района Перми площадью порядка 128 га. Территория расположена в пределах умеренно-континентальной климатической зоны, имеет асимметричную конфигурацию; общий уклон рельефа ориентирован на юго-восток, величина уклонов не превышает 5^0 . Участок размещен в правобережной части города: с запада и севера ограничен подъездными путями (от железнодорожного моста до станции Блочная), с востока граничит с лесным массивом «Закамский бор» и микрорайоном Верхняя Курья (восточнее ул. Лабинская).

В части инженерной защиты от подтопления предусмотрен комплекс мероприятий, включающий: организацию регулярного мониторинга уровней

грунтовых вод с последующей систематизацией и интерпретацией данных, устройство дренажных систем и водоотводов, а также проектирование локальных защитных сооружений (дамб и барьеров) для снижения рисков на наиболее уязвимых участках [8, 9].

Проектная модель ориентирована на формирование нового многофункционального района с функционально дифференцированной структурой и развитой инфраструктурой. Целевой установкой является создание качественной жилой среды при одновременной интеграции рекреационных, культурно-общественных и спортивных объектов, а также производственно-технологического компонента [10]. Функциональная структура территории включает следующие зоны (рис. 2):

- Зона аттракционов и событийной активности: парк развлечений, пространства для массовых мероприятий (в том числе амфитеатр), детские игровые площадки и объекты общественного питания. Планировочные решения ориентированы на ландшафтную интеграцию и организацию сети пешеходных маршрутов.

- Спортивная зона: многофункциональное спортивное поле, тренажерные площадки, беговые и велосипедные трассы, а также обслуживающие павильоны. Назначение зоны – обеспечение условий для повседневной физической активности и проведения локальных спортивных мероприятий.

- Зона общественных пространств у водоема: бульвары, пешеходные улицы, скверы, парковые фрагменты, площадки для культурных событий и временной экспозиционной активности, а также элементы малых архитектурных форм (мостики, пирсы, причалы). Зона формирует прибрежный рекреационный фронт и обеспечивает связность территории с водным каркасом.

- Зона малоэтажной жилой застройки: индивидуальное жилищное строительство и малоэтажные жилые объекты коммерческого сегмента. Улично-дорожная сеть организуется с ограничением транзитного движения и обеспечением приватности жилой среды; предусматривается благоустройство придомовых территорий.

- Производственно-технологическая зона (технопарк): размещение объектов технопарка в два этапа с включением рекреационных пространств для сотрудников. Разделение производственной и общественно-рекреационной частей обеспечивается планировочными и ландшафтными средствами, включая водный и зеленый буфер; предусматриваются транспортные подъезды, парковочные пространства и логистические элементы, а также шумозащитные и озелененные разрывы.

- Зона социальной инфраструктуры: медицинская организация (поликлиника) для обслуживания населения района и работников технопарка, с размещением амбулаторных подразделений и диагностического блока.

- Лесопарковая зона: территория природно-ориентированной рекреации, предусматривающая сохранение древесно-кустарниковой растительности, организацию экотроп (в том числе с настилами), смотровых площадок и зон кратковременного отдыха.

- Дополнительно предусматривается размещение объектов коммерческой и деловой инфраструктуры (торгово-развлекательный центр, супермаркеты, административно-деловой центр) и формирование транспортной схемы, обеспечивающей связь с городскими магистралями, общественным транспортом и

системой парковок. Парковочные пространства дифференцируются по режиму использования (краткосрочные и длительные), предусматриваются решения по снижению экологической нагрузки покрытий и установка зарядных станций для электромобилей.



Рис. 2. Эскиз функционального зонирования

Проектные решения сформированы с учетом ландшафтных характеристик территории и ее историко-пространственного контекста [10]. Концепция ориентирована на приоритетное сохранение природного каркаса за счет интеграции существующих озелененных массивов, формирования экологических маршрутов и обеспечения пространственной связности рекреационных зон (рис. 3).



Рис. 3. Вид проектируемой территории с высоты птичьего полета

Архитектурно-планировочная структура основана на принципе согласования застройки с природным рельефом и на разграничении производственно-технологических и общественно-жилых пространств [2]. Ключевым композиционным элементом выступают бульвары и «зеленые оси», связывающие основные функциональные зоны и формирующие систему доступных мест отдыха, ориентированных на повседневное использование [6].

Заключение

В целом проект направлен на реализацию целей устойчивого развития, повышение качества городской среды и формирование новой точки притяжения в структуре Перми. Применение современных архитектурных и экологически ориентированных решений обеспечивает интеграцию застройки в ландшафт при минимизации антропогенной нагрузки на окружающую среду.

Концепция развития территории в г. Перми подтверждает реализуемость комплексного освоения подтопляемой прибрежной зоны на основе сочетания ландшафтно-инженерных решений и многофункционального зонирования. Формирование искусственного водоема, дренажной инфраструктуры и зеленого каркаса переводит проблему подтопления из узко инженерной плоскости в основу для создания рекреационно-экологического каркаса городской территории.

Предложенная функционально-планировочная структура (технопарк, рекреационные, спортивные и общественные пространства, малоэтажная жилая застройка и объекты социальной инфраструктуры) формирует сбалансированный городской фрагмент, в пределах которого размещение рабочих мест, проживания и повседневной рекреации организовано в единой пространственной схеме (рис. 4). Интеграция производственно-технологической зоны с природным ландшафтом обеспечивается за счет зеленых буферов и выделенных рекреационных пространств для работников, что снижает вероятность экологических и социально-пространственных конфликтов (рис. 5–7).

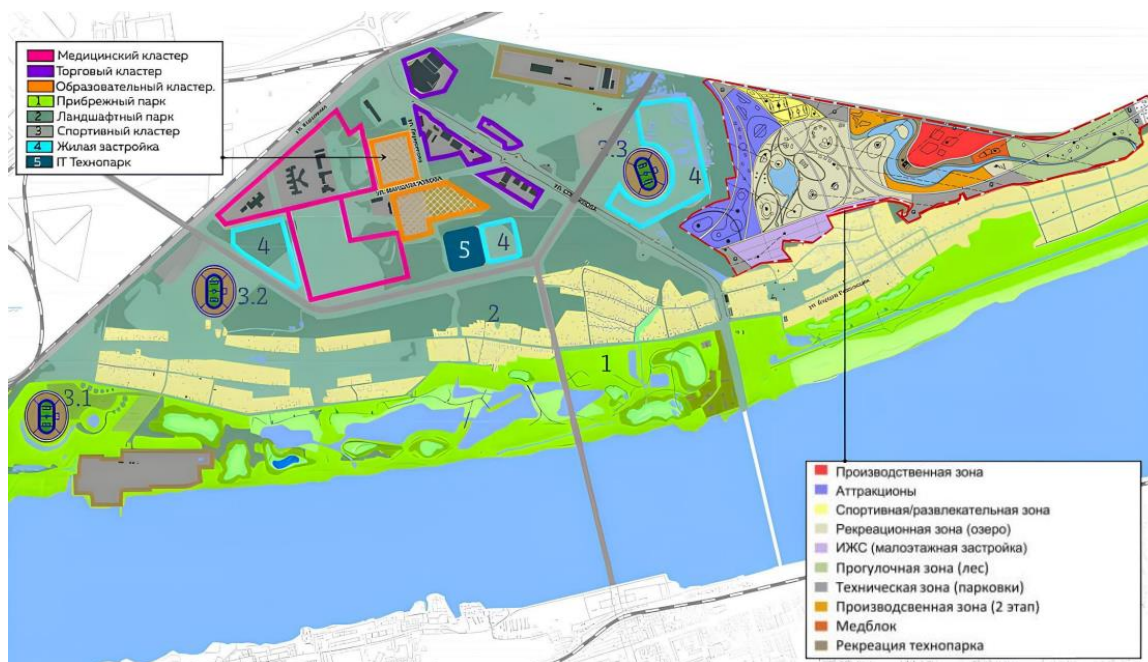


Рис. 4. Интеграция территории «Камская долина»



Рис. 5. Технопарк 1 этапа



Рис. 6. Технопарк 2 этапа



Рис. 7. Технопарк 1 и 2 этапов



Концепция демонстрирует переход от локальных мероприятий и точечной застройки к стратегическому сценарию развития: территория рассматривается как перспективный центр притяжения, основанный на принципах устойчивого управления природными ресурсами и формировании сети качественных общественных пространств. Предложенный подход может быть использован в качестве методической модели для иных прибрежных и проблемных зон российских городов, где требуется одновременное решение задач инженерной защиты, экологической реабилитации и повышения привлекательности городской среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Научно-методические аспекты разработки территориальных комплексных схем охраны окружающей среды городов : сборник научных трудов / Центральный научно-исследовательский и проектный институт по градостроительству ; под редакцией С. Б. Чистяковой. – Москва : ЦНИИП градостроительства, 1986. – 85 с.
2. Касьянов, В. Ф. Реконструкция жилой застройки городов : учебное пособие / В. Ф. Касьянов. – Москва : АСВ, 2005. – 224 с. – ISBN 5-93093-123-2.
3. Беляева, Е. Л. Экологическое дифференцирование городской среды в социальной диагностике и градостроительстве (к вопросу об оценке напряженности экологической ситуации в городах) / Е. Л. Беляева, Ю. В. Беляев // Социально обоснованное градостроительство в режиме прогнозного проектирования : от социальной диагностики к профилактике конфликтных ситуаций и конструктивному диалогу заинтересованных сторон. – Москва : Институт социологии РАН : Центр социального управления, коммуникации и социально-проектных технологий, 2005. – С. 323–341.
4. Беляева, Е. Л. Учет загрязнения воздушного бассейна в градостроительном проектировании (на примере крупных городов) : специальность 18.00.04 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Беляева Елена Львовна ; Центральный научно-исследовательский и проектный институт по градостроительству – Москва, 1989. – 25 с.
5. Беляева, Е. Л. Особенности благоустройства и озеленения исторических городов. Подходы и методические рекомендации : монография / Е. Л. Беляева. – Москва : Экон-Информ, 2021. – 270 с. – EDN YRVCHX.
6. Горохов, В. А. Инженерное благоустройство городских территорий и населенных мест / В. А. Горохов, О. С. Расторгуев. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 1994. – 457 с. – ISBN 5-274-01799-1.
7. Вергунов, А. П. Архитектурно-ландшафтная организация крупного города / А. П. Вергунов. – Ленинград : Стройиздат, 1982. – 135 с.
8. Шепелев, Н. П. Реконструкция городской застройки / Н. П. Шепелев, М. С. Шумилов. – Москва : Высшая школа, 2000. – 270 с. – ISBN 5-06-003699-5.
9. Шукуров, И. С. Организация инженерно-технического обустройства городских территории : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по программе бакалавриата по направлению 2700800 «Строительство» (профиль «Городское строительство») / И. С. Шукуров, М. А. Луняков, И. Р. Халилов. – Москва : АСВ, 2015. – 440 с. – ISBN 978-5-4323-0097-3.
10. Горохов, В. А. Городское зеленое строительство / В. А. Горохов. – Москва : Стройиздат, 1991. – 409 с. – ISBN 5-274-00737-6.



MARTYNOV Sergey Vladimirovich, master degree student of the chair of architectural environment design¹; **GLADYSHEVA Margarita Viktorovna**, associate professor of the chair of architecture and design²; **EROFEEVA Irina Vladimirovna**, associate professor of the chair of fundamentals of architecture and art communications³

TERRITORY DEVELOPMENT CONCEPT: THE CASE OF PERM

¹Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

²National Research Ogarev Mordovia State University. Institute of Architecture and Construction.

24, Sovetskaya St., Saransk, 430000, Russia.

Tel.: (951) 055-86-80; e-mail: nikel_its_me@mail.ru

³National Research Moscow State University of Civil Engineering.

26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia.

Key words: territory improvement, territory development, project, tourism potential.

The article discusses the concept of integrated development of the Kama Valley territory within the city of Perm. It proposes an approach based on a combination of landscape engineering measures and multifunctional zoning, which ensures the integration of residential, recreational, and industrial-technological functions. Based on the pre-project analysis, a planning model is substantiated with a system of public spaces near the water, boulevards and ecological trails, low-rise buildings, sports and event areas, a forest park, and a technology park, separated by green buffer zones. It has been shown that the formation of a recreational and ecological framework based on engineering protection increases the territory's sustainability and reduces the likelihood of environmental and functional-spatial conflicts.

REFERENCES

1. Nauchno-metodicheskie aspekty razrabotki territorialnykh kompleksnykh skhem okhrany okruzhayushchey sredy gorodov [Scientific and methodological aspects of the development of territorial comprehensive schemes for environmental protection of cities] : sbornik nauchnykh trudov. Tsentralny nauchno-issledovatel'skiy i proektny institut po gradostroitel'stvu ; pod redaktsiyey S. B. Chistyakovoy. Moscow, TsNIIP gradostroitel'stva, 1986, 85 p.

2. Kasyanov V. F. Rekonstruktsiya zhiloy zastroyki gorodov [Reconstruction of residential development in cities] : uchebnoe posobie. Moscow, ASV, 2005, 224 p. ISBN 5-93093-123-2.

3. Belyaeva E. L., Belyaev Yu. V. Ekologicheskoe differentsirovaniye gorodskoy sredy v sotsialnoy diagnostike i gradoustroystve (k voprosu ob otsenke napryazhennosti ekologicheskoy situatsii v gorodakh) [Ecological differentiation of the urban environment in social diagnostics and urban planning (on the issue of assessing the intensity of the ecological situation in cities)]. Sotsialno obosnovannoye gradoustroystvo v rezhime prognoznogo proektirovaniya : ot sotsialnoy diagnostiki k profilaktike konflikt nykh situatsiy i konstruktivnomu dialogu zainteresovannykh storon [Socially justified urban planning in the mode of predictive design: from social diagnostics to the prevention of conflict situations and constructive dialogue of stakeholders]. Moscow, Institut sotsiologii RAN : Tsentr sotsialnogo upravleniya, kommunikatsii i sotsialno-proektnykh tekhnologiy, 2005, P. 323–341.

4. Belyaeva E. L. Uchet zagryazneniya vozdushnogo basseyna v gradostroitel'nom proektirovanii (na primere krupnykh gorodov) [Accounting for air basin pollution in urban



planning (case study of large cities)] : spetsialnost 18.00.04 : avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk ; Tsentralny nauchno-issledovatel'skiy i proektny institut po gradostroitel'stvu. Moscow, 1989, 25 p.

5. Belyaeva E. L. Osobennosti blagoustroystva i ozeleneniya istoricheskikh gorodov. Podkhody i metodicheskie rekomendatsii [Features of improvement and landscaping of historical cities. Approaches and methodological recommendations] : monografiya. Moscow, Ekon-Inform, 2021, 270 p. EDN YRVCHX.

6. Gorokhov V. A., Rastorguyev O. S. Inzhenernoe blagoustroystvo gorodskikh territoriy i naselennykh mest [Engineering improvement of urban territories and settlements]. Izd. 4-e, pererab. i dop. Moscow, Stroyizdat, 1994, 457 p. ISBN 5-274-01799-1.

7. Vergunov A. P. Arkhitekturno-landshaftnaya organizatsiya krupnogo goroda [Architectural and landscape organization of a large city]. Leningrad, Stroyizdat, 1982, 135 p.

8. Shepelev N. P., Shumilov M. S. Rekonstruktsiya gorodskoy zastroyki [Reconstruction of urban development]. Moscow, Vysshaya shkola, 2000, 270 p. ISBN 5-06-003699-5.

9. Shukurov I. S., Lunyakov M. A., Khalilov I. R. Organizatsiya inzhenerno-tekhnicheskogo obustroystva gorodskikh territoriy [Organization of engineering and technical arrangement of urban territories] : uchebnoe posobie dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy, obuchayushchikhsya po programme bakalavriata po napravleniyu 2700800 «Stroitel'stvo» (profil «Gorodskoe stroitel'stvo»). Moscow, ASV, 2015, 440 p. ISBN 978-5-4323-0097-3.

10. Gorokhov V. A. Gorodskoe zelyonoe stroitel'stvo [Urban green construction]. Moscow, Stroyizdat, 1991, 409 p. ISBN 5-274-00737-6.

© С. М. Мартынов, М. В. Гладышева, И. В. Ерофеева 2026

Получено: 09.01.2026 г.



УДК 721(65-25)

Шоайб МЕДАНИ¹, аспирант; В. А. КУРОЧКИНА, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры архитектуры, реставрации и дизайна Инженерной академии¹, доц.²

АДАПТАЦИЯ АРХИТЕКТУРЫ К ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ УСЛОВИЯМ

¹ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы».

Россия, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

Тел.: (999) 863-85-69, эл. почта: choayb.medani@Gmail.com

²ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Тел.: (977) 291-72-05, эл. почта: kurochkina-va@rudn.ru

Ключевые слова: архитектура, адаптация, природное охлаждение, экстремальные температурные условия, жаркий климат, смягчение жары.

В данной статье рассматриваются архитектурные подходы, направленные на адаптацию зданий к экстремально жарким климатическим условиям, на примере городов Алжира. Рассмотрены исторические и современные методы, которые обеспечивают комфортную внутреннюю среду при значительных перепадах температур. Внимание уделено традиционным архитектурным элементам, а также новым подходам, таким как использование энергосберегающих материалов и технологий. На основе анализа литературных источников выявляются основные стратегии, применяемые для адаптации зданий в условиях экстремальной жары.

Введение

Города Алжира, особенно на юге страны, сталкиваются с экстремальными температурными условиями, характеризующимися сильной жарой, высоким уровнем солнечного излучения и засушливостью, при этом летние температуры часто превышают 40 °C (104 °F). Эти условия, усугубляемые урбанизацией и изменением климата, создают значительные трудности для жителей и инфраструктуры. Эффект городского теплового острова, частые пыльные бури и периодические наводнения еще больше осложняют условия жизни, непропорционально сильно влияя на уязвимые группы населения. По мере того, как изменение климата усиливает тепловые волны, необходимость в инновационных архитектурных решениях становится все более настоятельной, чтобы повысить устойчивость и снизить риски для здоровья.

В данной статье авторы исследуют архитектурные стратегии адаптации к экстремальной жаре в городах Алжира, сочетая традиционные методы с современными достижениями, рассматривают энергоэффективные материалы, устойчивые строительные практики и возникающие тенденции, одновременно решая проблемы внедрения и выступая за справедливые решения. Анализируя тематические исследования и исторические методы, авторы статьи стремятся предоставить практические рекомендации для политиков, архитекторов и общин, способствуя созданию устойчивой городской среды в Алжире и за его пределами [1].

Материалы и методы исследования

Архитектурные методологии в алжирских городах значительно эволюционировали для решения проблем экстремальной жары. Традиционные проекты были направлены на оптимизацию теплового комфорта и минимизацию энергопотребления, что было обусловлено суровым климатом региона. Местные материалы, такие как саман и камень, играли ключевую роль в создании сооружений с эффективными теплоизоляционными свойствами, позволяя им поглощать тепло днем и отдавать его ночью.

Традиционные дома отличались толстыми стенами и ограниченным количеством оконных проемов, что снижало прямое солнечное излучение и одновременно обеспечивало достаточный воздухообмен. Внутренние дворы стали распространенным архитектурным элементом, создавая затененные зоны, которые способствовали естественному охлаждению через вентиляцию, и часто включали водные элементы для испарительного охлаждения.

В таких регионах, как Уаргла, традиционные поселения, известные как «ксуры», имели компактную планировку, создающую микроклимат, защищающий жителей от экстремальных внешних условий. Планировка уделяла приоритет частной жизни, одновременно повышая тепловой комфорт, позволяя прохладному ветру циркулировать через узкие переулки и соединенные здания.

Архитектурные элементы, такие как ветровые носы (или «бадгири»), демонстрируют эффективные пассивные стратегии охлаждения, использующие естественные ветры для поддержания комфортной температуры внутри помещений без механических систем. Эти методы отражают глубокое понимание климатических условий историческими архитекторами, которые искали устойчивые решения, согласующиеся с их окружающей средой.

Кроме того, традиционная архитектура продемонстрировала замечательную адаптируемость, при которой сооружения часто модифицировались или перестраивались на основе знаний, накопленных поколениями, о местных погодных условиях и строительных практиках. Это богатое архитектурное наследие предоставляет ценные идеи для современных архитекторов, стремящихся создавать устойчивые проекты, которые решают современные проблемы экстремальной жары [2, 3].

Традиционная архитектура в алжирских городах развивалась на протяжении веков, чтобы эффективно справляться с экстремальным климатом региона, сочетая практичность с комфортом для жителей. Ключевые особенности включают использование местных материалов, таких как саман и камень, известных своими отличными теплоаккумулирующими свойствами. Эти материалы поглощают тепло днем и отдают его ночью, создавая температурный буфер против суровых внешних условий.

Архитектурный дизайн активно использует толстые стены и стратегически ограниченные оконные проемы. Значительная толщина стен не только изолирует от интенсивного солнечного излучения, но и обеспечивает тепло в холодные зимние ночи. Правильное расположение и ориентация окон играют решающую роль в этом дизайне; они обычно размещаются так, чтобы уменьшить прямое солнечное излучение в пиковые часы, одновременно обеспечивая перекрестную вентиляцию. Этот подход использует преобладающие ветры, способствуя естественному воздухообмену и охлаждению в жилых помещениях.



Традиционно дома организованы вокруг центрального двора, что улучшает циркуляцию воздуха и служит общественным пространством для отдыха и социального взаимодействия. Такая внутренняя планировка минимизирует воздействие солнечного тепла, создавая затененные зоны, где жители могут комфортно собираться. Декоративные элементы, такие как машрабии – резные решетчатые экраны, – дополнительно улучшают вентиляцию и уменьшают ослепляющий эффект от яркого солнца.

Кроме того, традиционные методы управления водой играют важную роль в повышении теплового комфорта. Ландшафтное проектирование с зелеными насаждениями вокруг домов помогает снизить местные температуры за счет тени и транспирации. В некоторых регионах дворы часто включают водные элементы, такие как фонтаны или пруды, которые обеспечивают охлаждающий эффект за счет испарения.

Эти архитектурные стратегии демонстрируют, как традиционные здания Алжира адаптировались к климатическим вызовам с течением времени. Они отражают глубокое понимание местных экологических условий и иллюстрируют гармоничную связь между построенными средами и их естественной окружающей средой [4–6].

В поисках энергоэффективности в архитектуре, особенно в жарком климате, таком как Алжир, появились многочисленные инновационные материалы и технологии. Одним из заметных достижений является использование фазовых материалов (ФМ), которые улучшают тепловые характеристики и позволяют создавать более тонкие стеновые конструкции. ФМ поглощают тепловую энергию при переходе из твердого состояния в жидкое и отдают ее при понижении температуры. Эта способность помогает поддерживать стабильный микроклимат внутри помещений, поглощая избыточное тепло днем и отдавая его ночью, что значительно снижает потребность в механических системах охлаждения.

Интеграция современных теплоизоляционных материалов также доказала свою эффективность в архитектурных проектах. Современные изоляционные технологии обеспечивают высокую тепловую сопротивляемость, что критично для минимизации теплопередачи через стены и крыши, поддерживая цели энергоэффективности. Тщательный выбор толщины и типа изоляционного материала особенно важен в засушливых регионах, где избыточное тепло может привести к дискомфорту и увеличению затрат на охлаждение.

Традиционные строительные материалы, такие как глина, камень и кирпич, по-прежнему играют важную роль в современной архитектуре благодаря своим естественным теплоаккумулирующим свойствам. Эти материалы эффективно поглощают и постепенно отдают тепло, помогая регулировать температуру в течение дня. Последние достижения в технологиях производства привели к созданию гибридных строительных материалов, сочетающих традиционные методы с современными инновациями для улучшения общих характеристик.

Окна и устройства затенения являются критически важными компонентами для повышения энергоэффективности. Высокопроизводительные стеклопакеты минимизируют солнечное излучение, одновременно оптимизируя поступление естественного света, улучшая дневное освещение без ущерба для комфорта. Кроме того, ориентация здания является важным фактором; стратегическое позиционирование сооружений может уменьшить прямое солнечное излучение на фасады, что приводит к снижению потребностей в охлаждении.

Интеграция решений на основе возобновляемых источников энергии, таких как солнечные панели, в строительные проекты открывает дополнительные возможности для энергосбережения и устойчивости. Эти системы не только вырабатывают чистую электроэнергию, но и могут быть интегрированы с пассивными стратегиями отопления и охлаждения, типичными для хорошо спроектированной архитектуры. В целом сочетание этих инновационных материалов и технологий способствует созданию более энергоэффективных зданий, которые лучше приспособлены к экстремальным климатическим условиям, одновременно содействуя экологической устойчивости [7, 8] (рис. 1, табл.).

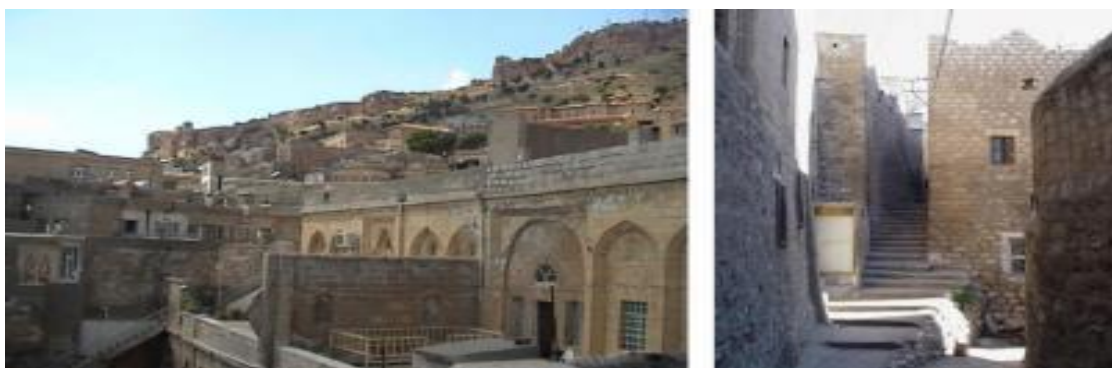


Рис. 1. Виды традиционного поселения в Мардине

Таблица

Резюме исследовательской базы

| № | Исследователь | Местоположение | Год | Независимая переменная | Вывод |
|---|-------------------|----------------|------|---|--|
| 1 | Гранадейру и др. | Португалия | 2013 | Физические характеристики здания | Материалы, площадь окон и форма здания являются наиболее важными факторами, влияющими на его потребление |
| 2 | Кантерса и Хорват | Швеция | 2012 | Геометрическая форма здания | Форма здания может удвоить потенциал поглощения солнечной энергии |
| 3 | Рафиян и др. | Иран | 2011 | Форма, плотность, ориентация, высота здания | Изменение формы, плотности, ориентации и высоты жилых зданий может снизить энергопотребление здания примерно на 45 % |

Применение энергоэффективных материалов и технологий в строительстве, особенно в жарких регионах, таких как Алжир, приносит значительные преимущества, но также сопряжено с определенными вызовами. Главным преимуществом является улучшение энергоэффективности. Материалы, предназначенные для отражения солнечного света, такие как термохромные покрытия и отражающие кровельные системы, могут значительно снизить зависимость от кондиционирования воздуха, поддерживая более прохладную температуру внутри помещений. Это не только уменьшает потребление энергии,

но и сокращает выбросы парниковых газов, связанные с производством электроэнергии.

Многие энергоэффективные материалы добываются локально и являются природными, что снижает транспортные расходы и уменьшает негативное воздействие на окружающую среду. Использование местных материалов, таких как глина, камень и песок, способствует развитию регионального ремесла и повышает устойчивость строительных практик. Этот подход поддерживает глобальные усилия по устойчивому развитию, поощряя биоклиматические стратегии, соответствующие местным климатическим условиям.

Однако интеграция этих передовых материалов в современные архитектурные проекты сталкивается с рядом вызовов. Первоначальные затраты, связанные с инновационными строительными решениями, могут отпугнуть многих застройщиков и строителей. Хотя энергоэффективные варианты могут привести к долгосрочной экономии за счет снижения эксплуатационных расходов, высокие первоначальные инвестиции часто препятствуют их немедленному внедрению. Кроме того, среди строителей может наблюдаться недостаток знаний о том, как эффективно использовать эти новые материалы в рамках традиционных строительных методик.

В заключение, хотя интеграция энергоэффективных материалов и технологий предлагает многообещающие преимущества для повышения энергоэффективности и устойчивости в строительстве, она также требует преодоления финансовых, образовательных и технических барьеров. Решая эти вызовы, строительная отрасль сможет лучше использовать инновации для создания устойчивых и экологически дружелюбных сооружений, отвечающих требованиям жаркого климата [9, 10] (рис. 2).

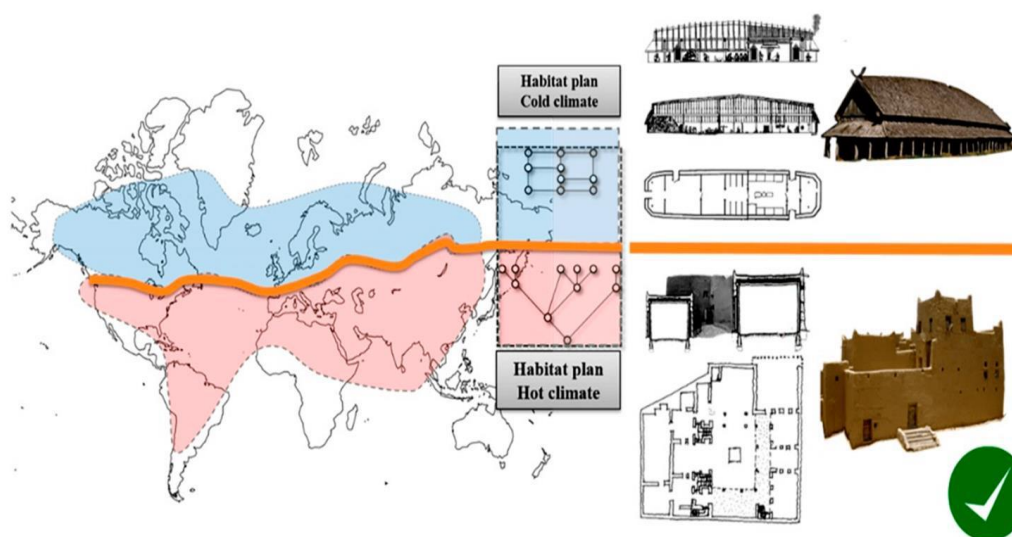


Рис. 2. Форма здания, конструкция и материалы в холодном и жарком климате

В регионах с экстремальной жарой архитекторы применяют различные стратегии для проектирования зданий, эффективно смягчающих высокие температуры. Ключевым подходом является использование пассивных методов охлаждения, которые опираются на естественные процессы для поддержания

комфортной внутренней среды без механических систем охлаждения. Это включает тщательный учет ориентации здания, выбора материалов и затенения.

Ориентация здания играет решающую роль в повышении энергоэффективности. Структуры часто проектируются так, чтобы уменьшить прямое солнечное излучение в часы пиковых температур, одновременно оптимизируя естественную вентиляцию. Например, расположение зданий вдоль оси восток-запад может ограничить проникновение дневного солнца через южные окна, тем самым снижая накопление тепла внутри.

Выбор материалов также значительно влияет на управление температурой. В засушливых климатических условиях для стен используются прочные материалы, такие как саман или камень, которые поглощают тепло днем и отдают его ночью, когда температура снижается. Напротив, во влажных регионах могут предпочтительно использоваться более легкие материалы с высокой теплоемкостью, где улучшенная вентиляция способствует охлаждению.

Устройства затенения жизненно важны для минимизации воздействия солнечного излучения на здания. Такие элементы, как козырьки, навесы и внешние затеняющие конструкции, эффективно блокируют прямые солнечные лучи, позволяя при этом естественному свету проникать внутрь. Кроме того, стратегически посаженные деревья и зелень вокруг зданий создают затененные зоны, которые помогают охлаждать окружающую среду за счет испарения и снижения скорости ветра.

Дизайн крыши также играет значительную роль в управлении теплом. Использование отражающих покрытий или материалов светлых тонов может значительно уменьшить поглощение тепла. Зеленые крыши не только обеспечивают изоляцию, но и способствуют регулированию температуры за счет испарения.

Методы вентиляции, включая открывающиеся окна и перекрестную вентиляцию, улучшают воздухообмен внутри зданий, создавая комфортный микроклимат без чрезмерного использования кондиционеров. Интеграция таких элементов, как солнечные трубы, может дополнительно усилить этот эффект, удаляя горячий воздух и привлекая прохладный.

В совокупности эти стратегии представляют целостный архитектурный ответ, который ставит во главу угла устойчивость и энергоэффективность, решая проблемы, связанные с экстремальной жарой в горячих климатических условиях [11–13].

Интеграция адаптивной архитектуры для борьбы с экстремальной жарой сталкивается с несколькими значительными вызовами. Одним из основных препятствий являются существующие нормативные рамки, которые часто отдают приоритет энергоэффективности над стратегиями, специально разработанными для условий экстремальной жары. Современные строительные нормы и правила поощряют высоко изолированные и герметичные конструкции, основанные на предположении, что здания будут в значительной степени зависеть от систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (ОВКВ). В климатических условиях с минимальным использованием ОВКВ такая изоляция может непреднамеренно вызывать перегрев, удерживая тепло внутри помещений и сводя на нет преимущества охлаждения.

Также наблюдается недостаток осведомленности среди заинтересованных сторон относительно необходимости адаптаций, учитывающих конкретный



контекст в архитектурной практике. Многие современные проекты могут включать традиционные элементы дизайна, но не могут адекватно реагировать на местные климатические условия. Это приводит к поверхностному сочетанию адаптивных стратегий, а не к их осмысленной интеграции, которая учитывает как экологические потребности, так и культурное наследие.

Экономические факторы еще больше усложняют ситуацию, поскольку внедрение передовых материалов и технологий, направленных на обеспечение теплового комфорта, часто влечет за собой более высокие первоначальные затраты, которых опасаются застройщики. Кроме того, социально-экономическое неравенство может ограничивать доступ к инновационным строительным решениям, оставляя менее обеспеченные сообщества без ресурсов или экспертизы, необходимых для внедрения современных проектов и материалов, способных смягчить последствия экстремальной жары.

Конфликты между целями городского планирования и индивидуальными предпочтениями также создают проблемы. Жители могут сопротивляться инициативам, направленным на увеличение зеленых зон или отражающих поверхностей, ссылаясь на опасения по поводу эстетики или стоимости недвижимости. Такое сопротивление может препятствовать реализации важнейших мер по адаптации к изменению климата.

Наконец, продолжающееся воздействие изменения климата требует регулярного обновления архитектурной практики, однако текущие методологии, как правило, являются жесткими и медленно эволюционируют. Без проактивных корректировок со стороны регулирующих органов для приведения строительных норм в соответствие с ожидаемыми будущими условиями преимущества адаптивной архитектуры могут остаться в значительной мере нереализованными [14–16].

Заключение

В статье подчеркивается настоятельная необходимость архитектурных адаптаций для борьбы с экстремальной жарой, особенно в таких регионах, как Алжир. Авторы выступают за сочетание традиционных архитектурных методов с современными дизайнерскими технологиями для повышения теплового комфорта и энергоэффективности. Исторические сооружения в городских районах Алжира на протяжении поколений успешно используют пассивные дизайнерские стратегии, такие как тщательная ориентация, компактные планировки, толстые стены и затененные открытые пространства, которые помогают им выдерживать высокие температуры.

Современная архитектура начинает внедрять инновационные материалы и технологии, способствующие устойчивому развитию, сохраняя при этом традиционную эстетику. Тематические исследования городских проектов демонстрируют, как эти подходы могут улучшить потребление энергии и снизить воздействие жары. Изучение энергоэффективных материалов раскрывает творческие решения, которые смягчают последствия экстремальной жары и вносят вклад в решение более широких проблем изменения климата.

В статье описываются различные стратегии, используемые архитекторами и городскими планировщиками для адаптации зданий к жаркому климату. Сравнительный анализ методик дает представление о передовых практиках, которые могут быть применены в аналогичных условиях. Основные уроки из этих

тематических исследований подчеркивают решающую роль устойчивой архитектуры в формировании будущих проектов в алжирских городах.

В перспективе растет внимание к возникающим технологиям и устойчивым практикам как ответам на растущие климатические вызовы. Подчеркивается важность сохранения традиционных знаний; сочетание традиционной мудрости с современными инновациями закладывает прочную основу для устойчивости к высоким температурам.

Важным выводом является признание барьеров, препятствующих внедрению адаптивных архитектурных решений. Проблемы, такие как финансовые ограничения, регуляторные препятствия и недостаточная осведомленность о доступных технологиях, могут быть решены с помощью целевых вмешательств и активного участия сообщества. В целом, эти выводы поддерживают идею гармонизации исторических знаний с современными дизайнами для создания устойчивых сред, способных процветать, несмотря на экстремальные климатические условия [17–19].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Булах, И. Перспективы устойчивого развития современной архитектуры в прибрежных городах Алжира / И. Булах. – URL: https://www.researchgate.net/publication/359149605_Prospects_for_the_Sustainable_Development_of_Modern_Architecture_in_the_Coastal_Cities_of_Algeria. – Текст : электронный.
2. Турек-Хэнкинс, Л. Л. Адаптация к изменению климата в условиях экстремальной жары: глобальный систематический обзор реализованных мер / Л. Л. Турек-Хэнкинс, Э. К. де Перес, Г. Скарпа. – URL: <https://academic.oup.com/oocc/article/1/1/kgab005/6290719>. – Текст : электронный.
3. Экологический профиль паспортов строительных материалов для жаркого климата / А. Альмусад, А. Альмссад, Раад З. Хомод, И. Йитмен. – URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/9/3720>. – Текст : электронный.
4. Оценка летнего теплового комфорта в засушливых пустынях. Пример: Старое глинобитное здание в Адраре (юг Алжира) / А. Бассуд, Х. Хелафи, А. М. Моктари, А. Бада. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132321005412>. – Текст : электронный.
5. Дель, М. С. Т. Т. Влияние формы плана здания на тепловой комфорт в традиционных жилых комплексах жаркого и сухого климата Кума / М. С. Т. Т. Дель, С. Байят, Н. Зоджай. – URL: <https://heritagesciencejournal.springeropen.com/articles/10.1186/s40494-022-00807-1>. – Текст : электронный.
6. Кылынч, М. Альтернативы стен с фазовыми материалами, эквивалентные традиционной оболочке здания в условиях жаркого сухого климата / М. Кылынч, Н. Т. Байрактар. – URL: https://publications.ibpsa.org/proceedings/usim/2022/papers/usim2022_p127.pdf. – Текст : электронный.
7. Абдрассилова, Г. Строительство оптимизированного энергетического потенциала / Г. Абдрассилова, Е. Данибекова. – URL: <https://sciendo.com/pdf/10.17512/bozpe.2022.11.17>. – Текст : электронный.
8. Обзор традиционных пассивных методов охлаждения, применимых в засушливых и теплых климатических условиях, с учетом экономического анализа затрат и эффективности в городах, основанных на ресурсах / Ю. Сонг, К. С. Дарани, Аднан И. Хдайр, Г. Абу-Румман, Р. Калбаси. –



URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721002742>. – Текст : электронный.

9. Преодоление инерции и барьеров для устойчивого охлаждения / Х. Лизана, Николь Д. Миранда, Л. Гросс [и др.]. – URL: <https://journal-buildingscities.org/articles/10.5334/bc.255>. – Текст : электронный.

10. Аль-Ясири, Ц. Включение фазовых материалов в оболочку здания для теплового комфорта и энергосбережения: комплексный анализ / Ц. Аль-Ясири, М. Сабо. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710220337542>. – Текст : электронный.

11. Тераа, С. От гигротермальной адаптации эндемичных растений к метеочувствительной биомиметической архитектуре: пример средиземноморского очага биоразнообразия на северо-востоке Алжира / С. Тераа, М. Беншериф. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-021-01887-y>. – Текст : электронный.

12. Лучший дизайн для холодных зданий как улучшенный дизайн зданий может сократить огромную потребность в кондиционировании воздуха в жарком климате. – URL: <https://www.pceb.build/cool-buildings-paper>. – Текст : электронный.

13. Группа, Г. К. К. Л. Как адаптировать ваш город к экстремальной жаре / Г. К. К. Л. Группа, К. Х. Хаб. – URL: https://www.c40knowledgehub.org/s/article/How-to-adapt-your-city-to-extreme-heat?language=en_US. – Текст : электронный.

14. Ближний восток: ориентированные на наследие подходы к климатической устойчивости, Cities Alliance. – URL: <https://www.citiesalliance.org/newsroom/news/results/mena-heritage-centric-approaches-climate-resilience>. – Текст : электронный.

15. Боузер, М. Стратегия адаптации к экстремальной жаре в округе Колумбия / М. Боузер. – URL: https://doee.dc.gov/sites/default/files/dc/sites/ddoe/service_content/attachments/2022%20Keep%20Cool%20DC_0.pdf. – Текст : электронный.

16. Переосмысление кондиционирования воздуха: традиционные методы охлаждения для будущего. – URL: <https://www.archdaily.com/996595/reimagining-air-conditioning-traditional-cooling-methods-for-the-future>. – Текст : электронный.

17. Защита калифорнийцев от экстремальной жары: план действий штата по укреплению устойчивости общин. – URL: <https://resources.ca.gov/-/media/CNRA-Website/Files/Initiatives/Climate-Resilience/2022-Final-Extreme-Heat-Action-Plan.pdf>. – Текст : электронный.

18. Себти, М. Оценка эффекта современной трансформации традиционного поселения «Ксар» в Уаргле на юге Алжира / М. Себти, Д. Алкама, А. Бушаир. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095263513000277>. – Текст : электронный.

19. Стратегии дизайна улиц на основе пространственных конфигураций и внешних оболочек зданий в связи с тепловым комфортом на открытом воздухе в засушливых климатических условиях / Ф. З. Б. Ратмия, А. Ахриз, Г. Санти [и др.]. – URL: https://www.researchgate.net/profile/WaqasMahar/publication/376829442_Street_Design_Strategies_Based_on_Spatial_Configurations_and_Building_External_Envelopes_in_Relation_to_Outdoor_Thermal_Comfort_in_Arid_Climates/links/658b00863c472d2e8e9069e7/Street-Design-Strategies-Based-on-Spatial-Configurations-and-Building-External-Envelopes-in-Relation-to-Outdoor-Thermal-Comfort-in-Arid-Climates.pdf. – Текст : электронный.



MEDANI Choayb¹, postgraduate student; KUROCHKINA Valentina Aleksandrovna, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of architecture, restoration and design¹, associate professor²

ADAPTATION OF ARCHITECTURE TO EXTREME TEMPERATURE CONDITIONS

¹Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba.

6, Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russia.

Tel.: (999) 863-85-69, e-mail: choayb.medani@Gmail.com

²Moscow State University of Civil Engineering (National Research University).

26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russia.

Tel.: (977) 291-72-05, e-mail: kurochkina-va@rudn.ru

Key words: architecture, adaptation, natural cooling, extreme temperature conditions, hot climate, heat mitigation.

The article explores architectural strategies for adapting buildings to extreme hot climates, focusing on Algerian cities. It reviews both historical and contemporary methods that ensure comfortable indoor environments despite significant temperature fluctuations. The analysis highlights traditional architectural elements alongside modern innovations, including energy-saving materials and technologies. Key strategies for building adaptation to extreme heat are identified based on a comprehensive review of relevant literature.

REFERENCES

1. Bulakh I. Perspektivy ustoychivogo razvitiya sovremennoy arkhitektury v pribrezhnykh gorodakh Alzhira [Prospects for the sustainable development of modern architecture in the coastal cities of Algeria]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/359149605_Prospects_for_the_Sustainable_Development_of_Modern_Architecture_in_the_Coastal_Cities_of_Algeria.
2. Turek-Khenkins L. L., de Peres E. K., Skarpa G. Adaptatsiya k izmeneniyu klimata v usloviyakh ekstremalnoy zhary: globalny sistemicheskiy obzor realizovannykh mer [Adaptation to climate change under extreme heat: a global systematic review of implemented measures]. – URL: <https://academic.oup.com/oocc/article/1/1/kgab005/6290719>.
3. Almusaed A., Almssad A., Raad Z. Khomod, Itmen I. Ekologicheskiy profil pasportov stroitelnykh materialov dlya zhar kogo klimata [Environmental profile of building material passports for hot climates]. – URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/9/3720>.
4. Bassud A., Khelafi Kh., Moktari A. M., Bada A. Otsenka letnego teplovogo komforta v zasushlivykh pustynyakh. Primer: Staroe glinobitnoe zdanie v Adrare (yug Alzhira) [Assessment of summer thermal comfort in arid deserts. Case study: Old rammed-earth building in Adrar (southern Algeria)]. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132321005412>.
5. Del M. S. T. T., Bayyat S., Zodzhai N. Vliyanie formy plana zdaniya na teplovoy komfort v traditsionnykh zhilykh kompleksakh zhar kogo i sukho go klimata Kuma [Influence of building plan shape on thermal comfort in traditional residential complexes of hot and dry climate of Kerman]. – URL: <https://heritagesciencejournal.springeropen.com/articles/10.1186/s40494-022-00807-1>.
6. Kylynch M., Bairaktar N. T. Alternativy sten s fazovymi materialami, ekvivalentnye traditsionnoy obolochke zdaniya v usloviyakh zhar kogo sukho go klimata [Wall alternatives with phase-change materials equivalent to traditional building envelope in hot-dry climate]

- conditions]. – URL: https://publications.ibpsa.org/proceedings/usim/2022/papers/usim2022_p127.pdf.
7. Abdrassilova G., Danibekova E. Stroitelstvo optimizirovannogo energeticheskogo potentsiala [Construction of optimized energy potential]. – URL: <https://sciencedirect.com/pdf/10.17512/bozpe.2022.11.17>.
8. Song Yu., Darani K. S., Adnan I. Khdayr, Abu-Rumman G., Kalbasi R. Obzor traditsionnykh passivnykh metodov okhlazhdeniya, primenimykh v zasushlivykh i teplykh klimaticheskikh usloviyakh, s uchetom ekonomicheskogo analiza zatrat i effektivnosti v gorodakh, osnovannykh na resursakh [Review of traditional passive cooling methods applicable in arid and warm climatic conditions, with consideration of economic cost-effectiveness analysis in resource-based cities]. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721002742>.
9. Lizana Kh., Miranda N. D., Gross L. [et al.]. Preodolenie inertsii i barerov dlya ustoychivogo okhlazhdeniya [Overcoming inertia and barriers to sustainable cooling]. – URL: <https://journal-buildingscities.org/articles/10.5334/bc.255>.
10. Al-Yasiri Ts., Sabo M. Vkluychenie fazovykh materialov v obolochku zdaniya dlya teplovogo komforta i energosberezheniya: kompleksnyy analiz [Incorporation of phase-change materials in building envelope for thermal comfort and energy saving: a comprehensive analysis]. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710220337542>.
11. Teraa S., Bensherif M. Ot gigrotermalnoy adaptatsii endemichnykh rasteniy k meteochuvstvitelnoy biomimeticheskoy arkhitekture: primer sredizemnomorskogo bioraznoobraziya na severo-vostoke Alzhira [From hygrothermal adaptation of endemic plants to weather-sensitive biomimetic architecture: a case of Mediterranean biodiversity in northeastern Algeria]. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-021-01887-y>.
12. Luchshiy dizayn dlya kholodnykh zdaniy kak uluchshennyy dizayn zdaniy mozhet sokratit ogromnyuyu potrebnost v konditsionirovanii vozdukha v zhar kom klimata [Better design for cool buildings: how improved building design can reduce massive air-conditioning demand in hot climates]. – URL: <https://www.peeb.build/cool-buildings-paper>.
13. Gruppa G. K. K. L., Khab K. Kh. Kak adaptirovat vash gorod k ekstremalnoy zhare [How to adapt your city to extreme heat]. – URL: https://www.c40knowledgehub.org/s/article/How-to-adapt-your-city-to-extreme-heat?language=en_US.
14. Blizhniy Vostok: orientirovannye na nasledie podkhody k klimaticheskoy ustoychivosti [Middle East: heritage-centric approaches to climate resilience], Cities Alliance. – URL: <https://www.citiesalliance.org/newsroom/news/results/mena-heritage-centric-approaches-climate-resilience>.
15. Bouzer M. Strategiya adaptatsii k ekstremalnoy zhare v okruge Kolumbiya [Extreme heat adaptation strategy in the District of Columbia]. – URL: https://doee.dc.gov/sites/default/files/dc/sites/ddoe/service_content/attachments/2022%20Keep%20Cool%20DC_0.pdf.
16. Pereosmyslenie konditsionirovaniya vozdukha: traditsionnye metody okhlazhdeniya dlya budushchego [Reimagining air conditioning: traditional cooling methods for the future]. – URL: <https://www.archdaily.com/996595/reimagining-air-conditioning-traditional-cooling-methods-for-the-future>.
17. Zashchita kaliforniytsev ot ekstremalnoy zhary: plan deystviy shtata po ukrepleniyu ustoychivosti obshchin [Protecting Californians from extreme heat: state action plan to strengthen community resilience]. – URL: <https://resources.ca.gov/-/media/CNRA-Website/Files/Initiatives/Climate-Resilience/2022-Final-Extreme-Heat-Action-Plan.pdf>.
18. Sebti M., Alkama D., Bushair A. Otsenka effekta sovremennoy transformatsii traditsionnogo poseleniya 'Ksar' v Uargle na yuge Alzhira [Assessment of the effect of modern transformation of the traditional 'Ksar' settlement in Ouargla, southern Algeria]. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095263513000277>.



19. Ratmiya F. Z. B., Akhriz A., Santi G. [et al.]. Strategii dizayna ulits na osnove prostranstvennykh konfiguratsiy i vneshnikh obolochek zdaniy v svyazi s teplovym komfortom na otkrytom vozdukh v zasushlivykh klimaticheskikh usloviyakh [Street design strategies based on spatial configurations and building external envelopes in relation to outdoor thermal comfort in arid climatic conditions]. – URL: https://www.researchgate.net/profile/WaqasMahar/publication/376829442_Street_Design_Strategies_Based_on_Spatial_Configurations_and_Building_External_Envelopes_in_Relation_to_Outdoor_Thermal_Comfort_in_Arid_Climates/links/658b00863c472d2e8e9069e7/Street-Design-Strategies-Based-on-Spatial-Configurations-and-Building-External-Envelopes-in-Relation-to-Outdoor-Thermal-Comfort-in-Arid-Climates.pdf.

© Шоайб Медани, В. А. Курочкина, 2026

Получено: 31.03.2026 г.



УДК 711.4 (574)

А. А. МУФТИГАЛИЕВА, аспирант кафедры «Архитектура»;
Н. В. ФУРМАН, канд. архитектуры, доц. кафедры «Архитектура»

ФОРМИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРНОГО ОБЛИКА УРАЛЬСКА В XVIII – НАЧАЛЕ XX ВЕКА

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.».

Россия, 4100054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77.

Тел.: (845) 299-88-94. эл. почта: amuftigalieva@mail.ru, catalpa1@mail.ru

Ключевые слова: архитектурное наследие Уральска, архитектурный облик, архитектурная идентичность, историческая застройка.

В статье рассматриваются основные этапы формирования архитектурного облика города Уральска в XVIII – начале XX вв. в контексте исторического становления города от военно-укрепленного поселения до административно-торгового центра региона.

Введение

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью научного осмысления процесса формирования архитектурного облика г. Уральска в контексте его исторического развития, а также задачами сохранения и популяризации объектов архитектурного наследия города.

Исследование опирается на труды историков, посвященные развитию города. Среди них особое место занимает научная работа Э. И. Герасимовой «Уральск. Исторический очерк (1613–1917 гг.)» [1]. Автор глубоко исследует этапы социально-экономического и культурного развития города, описывая его функциональный рост и эволюцию планировочной структуры. В свою очередь, Г. Г. Гурьева в своих работах предлагает богатый фактологический материал, раскрывая историю Уральска через призму повседневности, судеб горожан, общественной и культурной жизни [2]. Узловые этапы в развитии города в XVIII – XIX вв. освещены в коллективном труде, состоящем из очерков истории Уральска [3]. Краеведческие исследования Н. Г. Чеснокова и Г. Н. Мухина богаты ценными сведениями о градостроительстве, утраченных памятниках и трансформации городской среды [4–6].

Анализ историографии выявил [7], что, несмотря на наличие множества краеведческих материалов, комплексный научный анализ архитектуры и градостроительства Уральска XVIII – начала XX века до сих пор не осуществлен. Это делает данное исследование актуальным и определяет его цель: проследить закономерности развития архитектурного облика города в исторической перспективе и выявить основные этапы его формирования в XVIII – начале XX века.

Архитектурный облик Уральска XVIII века: Уральск – Яицкий городок

Формирование архитектурного облика Уральска в XVIII в. происходило в условиях становления Яицкого городка как военно-укрепленного поселения. Планировка города в тот период определялась расположением оборонительных

сооружений, казачьей и татарской слобод, а также церквей и хозяйственных построек. Преобладание деревянного строительства в архитектуре города отражало как местные строительные традиции, характерные для пограничных земель, так и экономические возможности жителей.

Переход к каменному строительству в Яицком городке относится к середине XVIII в. и связан со строительством в 1740–1751 гг. Михайло-Архангельского собора, который стал первой капитальной кирпичной постройкой города (рис. 1а цв. вклейки). Строительство собора сопровождалось созданием первого кирпичного производства, что дало толчок развитию строительства и ремесел в городе.

Несмотря на устоявшееся в исторических исследованиях Уральска отнесение архитектуры Михайло-Архангельского собора к псковско-новгородской школе, основанное на его лаконичности, массивности и скромном декоре, авторы данного исследования придерживаются иной позиции. Действительно, эти черты можно объяснить как художественными особенностями, так и оборонительной функцией храма, служившего убежищем в военное время. Имена зодчих, построивших храм, не сохранились. Известно, что храм был воздвигнут по инициативе атамана казачьего войска А. Бородина на средства казаков вместо деревянной церкви 1705–1706 годов постройки. Предположительно, для строительства каменного храма были привлечены московские зодчие, которые могли взять за основу конструктивно-пространственное решение Успенского собора в Московском Кремле: зально-ячеистую структуру на основе крестовых сводов на подпружных арках (рис. 1а цв. вклейки). Однако, архитектура объема собора решена по-иному. Авторы данного исследования предполагают, что образцом могли послужить храмы, возведенные по заказу промышленника Григория Строганова в стиле, известном как «Строгановское барокко» (рис. 1б цв. вклейки). Этот стиль, являющийся одним из направлений московского барокко конца XVII – начала XVIII века, преимущественно развивался в Приуральском регионе. Учитывая тесные связи яицких и волжских казаков со Строгановыми, влиятельными солепромышленниками и землевладельцами, которые привлекали их для охраны своих владений и выполнения других задач, знакомство яицких казаков с этим архитектурным направлением вполне вероятно. Для «Строгановского барокко» характерны пятиглавый силуэт, кубический или вытянутый основной объем с многоярусными окнами, украшенными декоративными ордерными элементами и пятнами. Важно отметить, что эти храмы были бесстолпными. Решение же построить четырехстолпный храм в Яицком городке, скорее всего, было осознанным выбором в пользу проверенной временем зально-ячеистой пространственно-конструктивной структуры.

Во второй половине XVIII в. Михайло-Архангельский собор стал не просто духовным центром, но и определяющей градостроительной доминантой на начальном этапе развития города. Расположение его на главной улице города, застроенной самыми красивыми и богато украшенными домами, подчеркивало его значимость. Таким образом, архитектура Яицкого городка в XVIII в. формировалась под воздействием военно-оборонительных, религиозных и ремесленных факторов.

После подавления восстания Пугачева в 1775 г. Яицкий городок, как его бывший центр, был переименован в Уральск по приказу Екатерины II и стал

административным центром Уральского казачьего войска. Но до конца XVIII в. Уральск оставался скромным провинциальным городом с преимущественно аграрным обликом.

Архитектурный облик Уральска первой половины XIX века

XIX в. стал определяющим этапом в формировании архитектурного облика Уральска как административного, торгового и культурного центра региона. Возросшее его экономическое значение во внутренней и внешней торговле империи притягивало сюда многих коммерсантов и прочих деловых людей. В конце XVIII – начале XIX века в городе появились дворяне и крепостные крестьяне. В первой половине XIX в. происходит активное развитие каменной застройки, формирование регулярной планировочной структуры, а также внедрение общеимперских архитектурных стилей, прежде всего классицизма и его поздних модификаций [8].

Частые пожары, вспыхивавшие в плотно застроенном деревянном городе, кардинально меняли его облик. После каждого бедствия деревянные здания уступали место каменным, а вместе с ними трансформировалась городская планировка и менялся общий архитектурный характер города. Так, для постройки нового каменного дома, взамен сгоревшего в 1821 г. деревянного, войсковой атаман Д. Бородин пригласил из Санкт-Петербурга архитектора итальянца М. Дельмедино, впоследствии ставшего ключевой фигурой в плановой застройке Уральска на протяжении следующего десятилетия (рис. 2а, 2б цв. вклейки). Известно, что М. Дельмедино начал работу над проектом главного православного храма Уральска – собора Александра Невского (ныне утрачен). Работу закончил А. Гопиус, вступивший в 1831 г. на должность войскового архитектора (рис. 3а, 3б цв. вклейки). По его проекту в 1838 г. было построено здание Войскового хозяйственного управления. Архитектура здания построена на строгой симметрии, характерной для зрелого классицизма: доминировании цельного восьмиколонного портика дорического ордера, а также лаконичности декора.

Архитектурный облик Уральска второй половины XIX – начала XX века

В 1868 г. должность войскового архитектора занял И. Тец, проявивший в Уральске интерес к восточной архитектуре, что отразилось в его ключевых работах: Русско-киргизской (казахской) ремесленной школе, его личном доме и, предположительно его авторства, доме купцов Ванюшиных (рис. 4а, 4б цв. вклейки). Архитектурный облик Уральска второй половины XIX в. представлял собой смешение классицизма и эклектики [9]. В этот период сформировались центральные улицы и площади, а также система общественных и жилых зданий, определивших городскую планировку и его архитектурную индивидуальность. Существенную роль в градостроительном развитии города сыграла купеческая среда, определившая характер доходных домов, торговых и общественных зданий.

В конце XIX – начале XX века Уральск переживал бурный социально-экономический подъем. Рост торговли, укрепление банковской системы, развитие сферы услуг и общественной жизни стимулировали активное строительство, в том числе общественных и доходных зданий [10]. Это привело к формированию нового архитектурного облика центральных улиц, где доминировала эклектика, сочетающая черты классицизма, барокко и неорусского стиля. Примером

**К СТАТЬЕ А. А. МУФТИГАЛИЕВОЙ, Н. В. ФУРМАН
«ФОРМИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРНОГО ОБЛИКА УРАЛЬСКА
В XVIII – НАЧАЛЕ XX ВЕКА»**

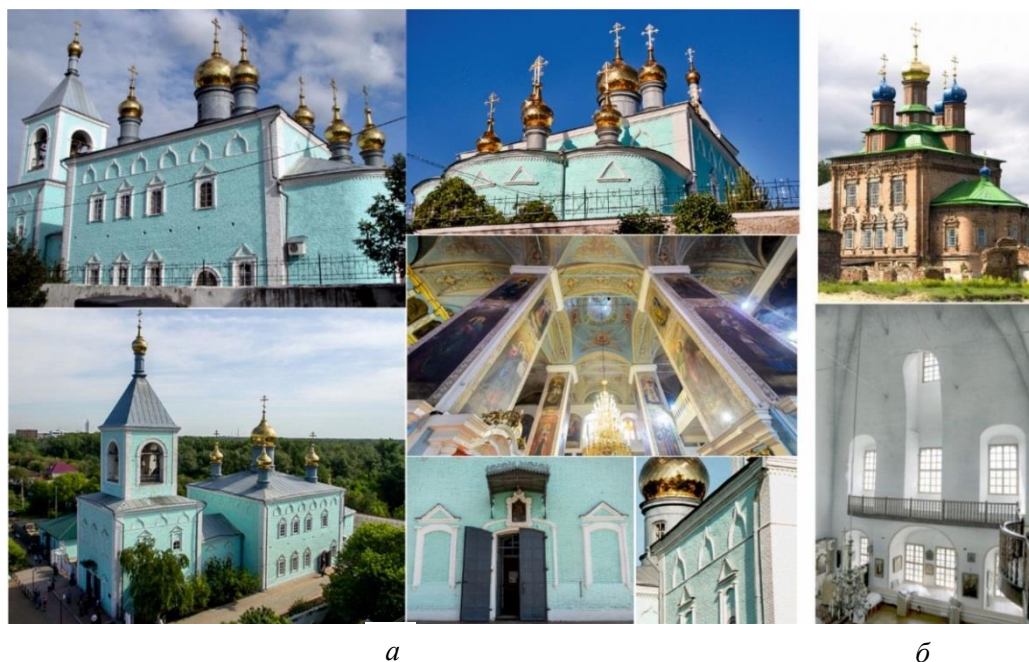


Рис. 1. «Строгановское барокко»: *а* – Михайло-Архангельский собор в г. Уральске (1740–1751 гг., новая каменная колокольня); *б* – Спасо-Преображенский собор в селе Новое Усолье (1724–1731 гг.)

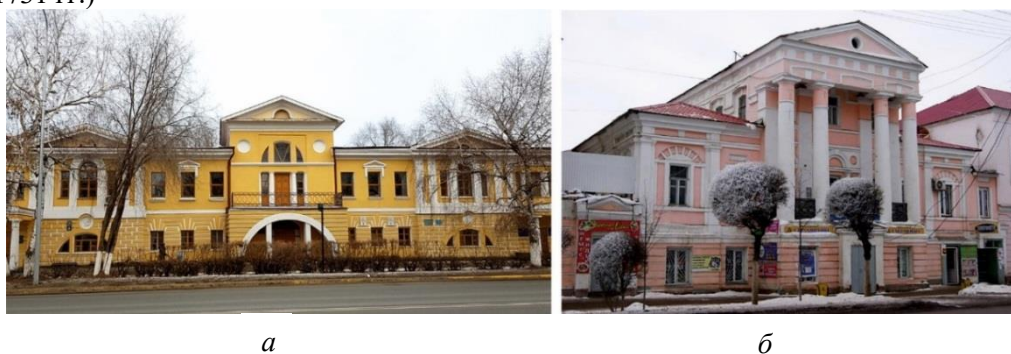


Рис. 2. Классицизм: *а* – Дом наказных атаманов (1823 г., арх. М. Дельмедино); *б* – Дом итальянского архитектора Дельмедино (1821 г., арх. М. Дельмедино)

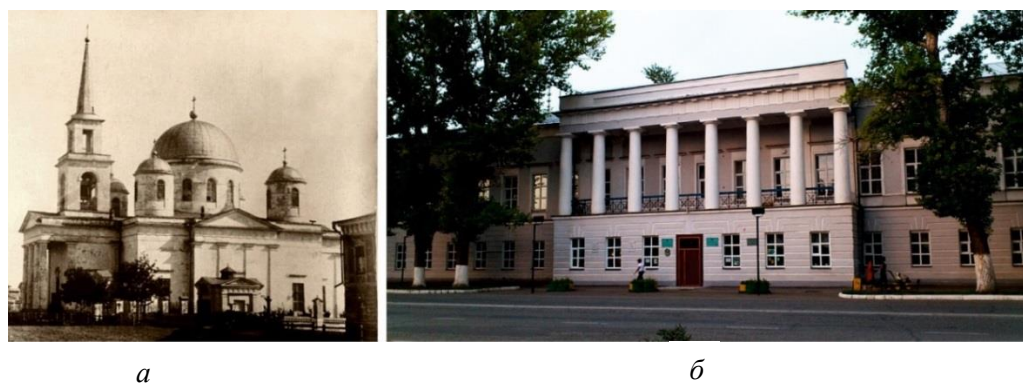


Рис. 3. Классицизм: *а* – Собор Александра Невского (1837–1849 гг., арх. М. Дельмедино); *б* – здание Войскового хозяйственного правления (1838 г., арх. А. Гопиус, М. Дельмедино)



а



б

Рис. 4. Эkleктика: *а* – Русско-киргизская (казахская) ремесленная школа (1879 г., арх. Э. Корф, И. Тец); *б* – Дом купцов Ванюшиных (1870 г., предположительно арх. И. Тец)



а



б

Рис. 5. Эkleктика: *а* – Гостиница «Россия» купца Маслова (1889 г.; *б* – Особняк Овчинникова (1878 г.)



а



б

Рис. 6. Эkleктика: *а* – Уральское отделение Русского Торгово-Промышленного коммерческого банка (1896 г., арх. А. Бунькин, Н. Раевский); *б* – Дом купца Карева (1900 г.)



а



б

Рис. 7. Эkleктика: *а* – Храм Христа Спасителя (1891–1907 гг., арх. В. Чагин, И. Железнов, И. Тец); *б* – Красная мечеть (1871 г.)

последнего является здание гостиницы «Россия» (рис. 5а цв. вклейки) купца Маслова, занимавшее значимое место в городской среде: в нем располагались залы для культурных мероприятий, синематограф. Архитектурный облик подчеркивало его статус как важного общественного объекта. Эклектичность архитектурного решения отражала стремление к репрезентативности и визуальной выразительности.

К числу ключевых градоформирующих объектов начала XX в. относится также здание Коммерческого банка (рис. 6а цв. вклейки). Ампиризм, как торжественная разновидность классицизма, воплотился здесь в массивности объемов, четкой симметрии фасада, использовании коринфских колонн, развитых балконов, скульптурного декора и арочного входного портала. Здание стало важнейшей архитектурной доминантой центральной части города и до настоящего времени сохраняет градостроительное значение [11].

Формирование общественного центра Уральска сопровождалось строительством доходных домов. Ярким примером является дом Карева (рис. 6б цв. вклейки), представлявший собой многофункциональное здание с торговыми помещениями на первом этаже, концертным залом и общественными залами на втором и гостиничными номерами на третьем. Архитектура здания сочетает рациональную планировочную схему с выразительным фасадным решением, в котором использованы балконы с художественной ковкой, фронтон с датой постройки, лепные декоративные элементы.

Эклектичные тенденции отчетливо прослеживаются и в архитектуре жилых особняков состоятельных горожан. Для них характерны асимметричные, уплощенные фасадные решения, использование лепного декора с мотивами классицизма, барокко и рококо. Такие здания выполняли не только жилую функцию, но и выступали выразительными визуальными акцентами городской среды (рис. 5б цв. вклейки).

Культовая архитектура Уральска XVIII - начала XX века

В многонациональном и многоконфессиональном Уральске культовые сооружения – православные храмы, мечети и старообрядческие церкви – занимали ключевое место в пространственной структуре города XVIII – начала XX века, формируя систему визуальных доминант, вокруг которых складывались жилые кварталы, торговые площади и общественные пространства. Закономерно, что архитектурные стили культовых сооружений, вне зависимости от их конфессиональной принадлежности, претерпевали изменения, следуя общим тенденциям в архитектуре: барокко (строгановское барокко), классицизм, эклектика (неорусский стиль, неоклассицизм) (рис. 1а, 3а, 7а, 7б цв. вклейки).

Таким образом, архитектура Уральска конца XIX – начала XX века формируется в русле эклектических тенденций, отражающих стремление к художественному разнообразию, представительности и функциональной насыщенности. Общественные здания, доходные дома и особняки данного периода сыграли ключевую роль в формировании исторического центра города, определив его пространственную организацию и архитектурную выразительность на рубеже столетий. Признавая эклектику как самодостаточный, заверченный и самобытный стиль, который утверждает выбор и синтез как фундаментальные характеристики и методы, мы можем констатировать, что в процессе исторического развития Уральска сформировалась его собственная, уникальная эклектичная стилевая система [12]. Формирование регионального своеобразия в



архитектуре эклектики в большей степени определено объективными факторами, например, такими как преемственность архитектурных традиций, нежели субъективными вкусовыми предпочтениями заказчиков [13].

Заключение

Архитектурный облик Уральска XVIII – начала XX века является отражением его исторической трансформации, проявившейся в уникальном смешении архитектурных стилей и местных культурных традиций. Эклектика стала определяющей стилистической системой архитектурного облика Уральска, и изучение процессов ее становления является предметом дальнейших научных изысканий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Герасимова, Э. И. Уральск : исторический очерк (1613–1917 гг.) / Э. И. Герасимова. – Алма-Ата : Наука, 1969. – 215 с.
2. Гурьева, Г. Г. Летит столетье над Уралом... : 400-летию Уральска посвящается (1613-2013) / Г. Г. Гурьева. – Уральск : Sophie Style, 2015. – 324 с. – ISBN 9786018045226.
3. Уральск: древний и современный : очерки истории / И. В. Ерофеева, М. Н. Сдыков, С. С. Кривобокова, В. А. Иночкин ; под общей редакцией М. Н. Сдыкова ; Западно-Казахстанский областной центр истории и археологии. – Уральск : [б. и.], 2012. – 336 с. – ISBN 978-601-7356-24-8.
4. Чесноков, Н. Г. Город малиновых зорь : с попутчиком по Уральску. Этюды и размышления. Книга 1 / Н. Г. Чесноков. – Уральск : Оптима, 2010. – 504 с.
5. Чесноков, Н. Г. Город малиновых зорь : с попутчиком по Уральску. Этюды и размышления. Книга 2 / Н. Г. Чесноков. – Уральск : Оптима, 2011. – 672 с.
6. Мухин, Г. Н. Лицо старого Уральска / Г. Н. Мухин. – Уральск : Оптима, 2003. – 109 с. – ISBN 9965-9370-8-7.
7. Соклаков, А. Ю. 400 лет Уральска в историографии нового и новейшего времени / А. Ю. Соклаков // Наука. Общество. Оборона. – 2013. – № 1. – С. 10.
8. Сдыков, И. Ж. История Западного Казахстана в XVIII–XIX веках / И. Ж. Сдыков. – Уральск : Западно-Казахстанский университет, 2008. – 286 с.
9. История архитектуры Казахстана / под ред. К. Б. Байпакова. – Алматы : Онер, 2007. – 352 с.
10. Гурьева, Г. Г. Уральск : история города / Г. Г. Гурьева ; редактор А. В. Голубев. – Уральск : Полиграфсервис, 2025. – 280 с. – ISBN 9786017424879.
11. История города Уральска. – Алматы : Liber, 2023. – 416 с.
12. Худин, А. А. Эклектика в архитектуре Нижнего Новгорода XIX - начала XX вв.: специальность 05.23.20 : диссертация на соискание ученой степени кандидата архитектуры / Худин Алексей Александрович ; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2010. – 192 с.
13. Шульгина, Д. П. Архитектура эклектики российской провинции: опыт выявления и анализа региональных различий (на материале Владимирской и Калужской губерний) : специальность 17.00.04 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата искусствоведения / Шульгина Дарья Павловна ; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова. – Москва, 2007. – 22 с.



MUFTIGALIYEVA Aliya Adiyetovna, postgraduate student of the chair of architecture; FURMAN Nina Viktorovna, candidate of architecture, associate professor of the chair of architecture

FORMATION OF THE ARCHITECTURAL APPEARANCE OF URALSK IN THE 18th – EARLY 20th CENTURIES

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russia.

Tel.: (845) 299-88-94 e-mail: amuftigalieva@mail.ru, catalpal@mail.ru

Key words: Uralsk's architectural heritage, architectural appearance, architectural identity, historical buildings.

The article examines the main stages of the formation of the architectural appearance of the city of Uralsk in the 18th – early 20th centuries, in the context of the city's historical development from a military-fortified settlement to an administrative and trade center of the region.

REFERENCES

1. Gerasimova E. I. Uralsk: istoricheskiy ocherk (1613–1917 gg.) [Uralsk: Historical essay (1613–1917)]. Alma-Ata, Nauka, 1969, 215 p.
2. Guryeva G. G. Letit stoletye nad Uralom [A century flies over the Ural]. Uralsk, Sophie Style, 2015, 324 p.
3. Erofeeva I. V., Sdykov M. N., Krivobokova S. S., Inochkin V. A. Uralsk: drevniy i sovremenny [Uralsk: ancient and modern]: ocherki istorii. pod obshchey redaktsiei M. N. Sdykova; Zapadno-Kazakhstanskiy oblastnoy tsentr istorii i arkheologii. Uralsk, 2012, 336 p.
4. Chesnokov N. G. Gorod malinovykh zor: s poputchikom po Uralsku. Etyudy i razmyshleniya. [City of crimson dawns: with a companion through Uralsk. Essays and reflections]. Kn. 1. Uralsk, Optima, 2010, 504 p.
5. Chesnokov N. G. Gorod malinovykh zor: s poputchikom po Uralsku. Etyudy i razmyshleniya. [City of crimson dawns: with a companion through Uralsk. Essays and reflections]. Kn. 2. Uralsk, Optima, 2011, 672 p.
6. Mukhin G. N. Litso starogo Uralska [The face of old Uralsk]. Uralsk, Optima, 2003, 109 p.
7. Soklakov A. Yu. 400 let Uralska v istoriografii novogo i noveyshego vremeni [Uralsk in the Historiography of Modern and Contemporary Times]. Nauka. Obshchestvo. Oborona. [Science. Society. Defense]. 2013, № 1, P. 10.
8. Sdykov I. Zh. Istoriya Zapadnogo Kazakhstana v XVIII–XIX vekakh [History of Western Kazakhstan in the 18th–19th centuries]. Uralsk, Zapadno-Kazakhstanskiy universitet, 2008, 286 p.
9. Istoriya arkhitektury Kazakhstana [History of architecture of Kazakhstan]. pod red. K. B. Baypakova. Almaty, Oner, 2007, 352 p.
10. Guryeva G. G. Uralsk: istoriya goroda [Uralsk: history of the city]. pod red. A. V. Golubeva. Uralsk, Poligrafservis, 2025, 280 p.
11. Istoriya goroda Uralska [History of the city of Uralsk]. Almaty, Liber, 2023, 416 p.
12. Khudin A. A. Eklektika v arkhiterture Nizhnego Novgoroda XIX - nachala XX vv. [Eclecticism in the Architecture of Nizhny Novgorod in the 19th and Early 20th Centuries]. spetsialnost 05.23.20 : diss. ... kand. arkhitektury, Nizhny Novgorod, 2010, 192 p.



13. Shulgina D. P. Arkhitektura eklektiki rossiyskoy provintsii: opyt vyyavleniya i analiza regionalnykh razlichiy (na materiale Vladimirskey i Kaluzhskoy guberniy) [The Architecture of Eclecticism in the Russian Province: An Examination and Analysis of Regional Differences (Based on the Materials of Vladimir and Kaluga Governorates)]. spetsialnost 17.00.04 : avtoreferat diss. ... kand. iskusstvovedeniya, Moscow, 2008, 22 p.

© А. А. Муфтигалиева, Н. В. Фурман, 2026

Получено: 22.01.2026 г.



УДК 726.03 (470.341)

Д. В. БАРИНОВ, аспирант кафедры истории архитектуры и основ архитектурного проектирования

ТИПЫ ПЛАНИРОВОЧНЫХ ПОСТРОЕНИЙ ХРАМОВ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ КОНЦА XVIII – ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЫ XIX ВЕКОВ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (909) 295-06-82; эл. почта: dm.archirest@gmail.com

Ключевые слова: архитектура Нижегородской области, храмовая архитектура Нижегородской области, планировочные композиции храмов, нижегородский классицизм.

В статье рассматриваются характерные типы планировочных композиций храмов, возведенных на территории Нижегородской области в период конца XVIII – первой половины XIX веков. Автором проведен анализ типов планировочных композиций храмовых сооружений, были выделены две принципиальные архитектурные группы – линейные и центрические сооружения, а также их локальные вариации.

Введение

Период конца XVIII – первой половины XIX веков стал важным этапом в формировании архитектурного облика Нижегородской области, когда храмовое строительство находилось на пике за всю дореволюционную историю области. Несмотря на значительное число сохранившихся памятников (около 360 объектов), систематизация их планировочных типов не проводилась, что свидетельствует о необходимости проведения комплексного исследования.

Цель и методы

Целью статьи является изучение и анализ типологических групп планировочных композиций памятников храмовой архитектуры конца XVIII – первой половины XIX веков на территории Нижегородской области.

Данная работа основывается на традиционных методах историко-архитектурных исследований, в частности, комплексный типологический анализ памятников храмовой архитектуры с учетом локальных особенностей объектов. Выявление сохранившихся и утраченных объектов основывается на архивных источниках и труде Макария (Миролюбов Н. К.) «Памятники церковных древностей в Нижегородской губернии» [1], в котором были собраны статистические данные о храмах Нижегородской губернии.

Характеристика храмовой архитектуры Нижегородской области конца XVIII – первой половины XIX веков

Хронологические рамки стилистического развития в провинциальной храмовой архитектуре отличаются от стиля столиц, Санкт-Петербурга и Москвы [2]. И если к концу XVIII века в крупных городах господствовали устоявшиеся вариации классицизма, то на территории Нижегородской области только появляются первые образцы нового стиля, зачастую с явными реминисценциями барокко. В это время появляются новые типы объемно-

пространственных композиций церквей, которые встраиваются в общую тенденцию интеграции классицистических и барочных тенденций [3].

Начало XIX века можно характеризовать переходом к этапу повсеместного распространения стиля классицизм, что приводит к увеличению типологических схем планировочного построения церквей, закреплению новых типов объемно-пространственных композиций. При этом все равно устойчивая линейная схема в этот период оказывается наиболее востребованной, практически все храмы так или иначе воспроизводили подобную структуру, но можно отметить и активное строительство центральных храмов, особенно после войны 1812 года, что свидетельствовало о становлении стиля ампира.

После выпуска сборников образцовых проектов церквей 1824 года наметились другие настроения, храмовая архитектура подвергалась строгой регламентации, что было связано с общегосударственной политикой [4, стр. 219], в то же время развитие образцовых заказов позволяло расширить строительство в приходах, селах, уездных городах, что не могли себе позволить дипломированных архитекторов. В течение второй четверти XIX века произошел процесс смещения главенства стиля классицизм и постепенный переход к архитектурной эклектике. Стилизация и поиски нового русского стиля занимают столичных архитекторов. В это же время в храмовой архитектуре нижегородской области происходит инертное строительство классицистических объектов, вплоть до 1850-х гг., поэтому в теме статьи был обозначен этот период как исследуемый.

Стоит обозначить круг последних работ, на который опирается данное исследование: самые актуальные исследования, в которых рассматривается храмовая архитектура классицизма, относятся к диссертациям об иконографии храмов классицизма И. Е. Путятин [5] и о типологии ротондальных храмов А. Н. Яковлева [6]. Основы типологической классификации и систематизации храмовой архитектуры в частности и всех объектов культурного наследия в целом были заложены отделом Свода Института искусствознания, издающим монументальный труд «Свод памятников архитектуры и монументального искусства России» [7], где центральную роль занимал в исследовании храмовых построек В. И. Плужников, на методологии которого базируется настоящая статья [8, 9].

На территории Нижегородской области конца XVIII – первой половины XIX веков можно выявить две устойчивых типологических группы. Первый тип можно отнести к традиционным построениям культовых храмовых зданий, идущих от архитектуры барокко и древнерусской архитектуры – линейный (рис. 1). Второй тип, связанный по своей природе с новыми классицистическими влияниями, – центральный (рис. 2). Рассмотрим подробнее каждую группу.



Рис. 1. Типы линейного построения композиций храмовых зданий: 1 – трехчастный, 2 – двухчастный с колокольней, 3 – двухчастный без колокольни, 4 – с ротондальным объемом

Линейный тип планировочного построения храмов

Схема с расположением на продольной оси основного объема храма, трапезной и колокольни была наиболее устойчивой и во время барокко XVIII столетия и в допетровское время, поэтому продолжила существование на территории Нижегородской области в первой половине XIX века. Данный тип полностью отвечал требованиям традиционных канонов и функциональным потребностям церковных приходских общин. Его постоянство и приспособление в эпоху классицизма выражается в переходе типа восьмерика на четверике с трапезной и колокольней, традиционный тип «корабль» в тип ротонда на четверике с трапезной и колокольней.

Линейный (иногда именуется **одноосный**) тип – самый распространенный тип построения композиции церквей, его особенностью является постановка одним за другим объемов храма, трапезной и колокольни по оси восток-запад. Ярким примером может являться храм Успения Богородицы (1820–1826 гг.) в г. Бор с линейной композицией (рис. 1.1), где на единой оси скомпонованы объем повышенного четверика с двумя четырехколонными портиками, перекрытым сомкнутым сводом и завершенным пятиглавием по сторонам света, объем прямоугольной трапезной с двумя приделами и квадратной ярусной колокольней, завершенной классицистическим шпилем. В данном образце можно видеть утилитарность линейного типа с яркими проявлениями стиля классицизм.

Линейный тип можно разделить на **двухчастный** и **трехчастный**. Линейный трехчастный тип мы рассмотрели на примере борского храма, но стоит

отметить, что схема может быть и одновременной интенцией при проектировании и вынужденным шагом при расширении храмов, дополнениями их пространства трапезных и приделов или стыковки колоколен с основным объемом храма. Так или иначе этот тип пользуется наибольшей популярностью как в XVIII, так и в XIX веках на территории Нижегородской области.

Редким является тип двухчастной компоновки объемов, который, в свою очередь, находится в двух вариациях. Первая вариация выражается через соединение в планировочной композиции храма двух объемов основного храма и пристроенной к нему колокольни. Таким примером может служить Казанская церковь (прибл. 1840-е гг.) в с. Нутренка (рис. 1.2), где квадратный массивный четверик, внутреннее пространство которого содержит в центре ротонду, соединяется с двухчастной ярусной колокольной со шпилем.

Другая вариация проявляется в построении планировочной композиции без колокольни, как в храме Всех Святых (1832–1834 гг.) в г. Саров (рис. 1.3). Линейная композиция строится за счет пристройки к главному ротондальному объему храма равнозначных трапезной и алтаря, вытягивая таким образом планировку по оси запад-восток.

Встречаются различные вариации основного объема, от прямоугольных и квадратных четвериков, завершенных восьмериком или куполом, до ротонд. Интересным образом является храм Покрова Богородицы (1820 г.) в с. Борисово-Покровское (рис. 1.4), где объем ротонды с галереей компонуется с небольшой трапезной и двухколоколенной папертью, образуя уникальную линейную композицию, нетипичную для Нижегородской области.

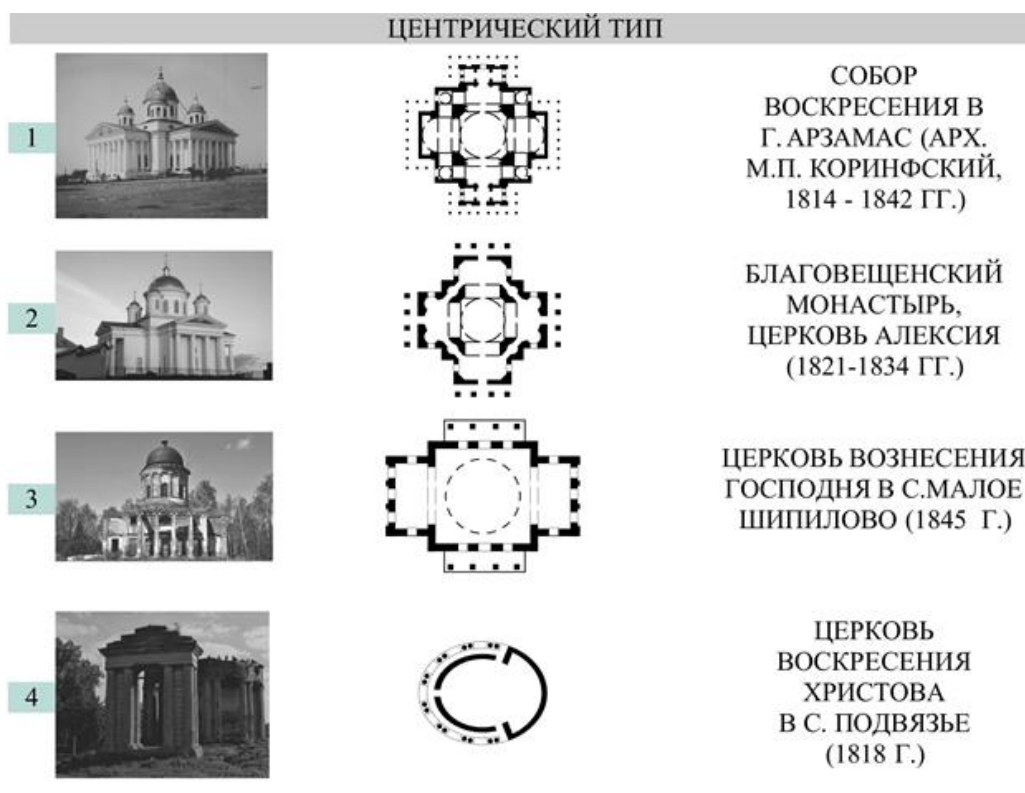


Рис. 2. Типы центрического построения композиций храмовых зданий: 1, 2 – в форме «греческого креста», 3 – с двумя объемными портиками, 4 – с эллипсовидной ротондой

Центрический тип планировочного построения храмов

В основе линейного типа композиций храмов, стоит отметить, лежит функциональное начало, которое диктует дифференциацию объемов, второй тип **центрический** (иногда называемый многоосный) изначально выражает стремление к чистоте построения пространства, зачастую компактности объемного решения. Можно обнаружить три формы выражения центричности в планировочной композиции.

План в форме «греческого креста» свидетельствует о чистой классицистической композиции памятника, зачастую такие храмы наделены выступающими колонными портиками. Выразительным примером такого построения является Воскресенский храм (1814–1842 гг., арх. М. П. Коринфский) в г. Арзамасе (рис. 2.1), где ампириная композиция памятника строится из центрического объема храма с выступающими восьмиколонными портиками ионического ордера [10]. Такие монументальные сооружения были важнейшими градостроительными доминантами в эпоху классицизма. Более локальным является Алексеевский храм (1821–1834 гг.) Благовещенского монастыря в Нижнем Новгороде (рис. 2.2), сформированный в форме греческого креста, дополняется выступающими четырехколонными портиками дорического ордера.

Формально к центрическому относится интересный тип построения, где внутреннее пространство линейное, вытянутое по оси запад-восток, дополняется и уравнивается выступающими колонными портиками по оси юг-север, что формирует впечатление центричности сооружения. Данный прием используется в храме Вознесения Господня (1845 г.) в с. Малое Шипилово (рис. 2.3), где ризалиты уравновешены четырехколонными портиками ионического ордера и общая композиция тяготеет к центральной ротонде.

Центрические ротонды в храмовом зодчестве – яркие образцы стиля классицизм [11], и на территории области была выявлена уникальная ротонда в форме эллипса – храм Воскресения Христова (1818 г.) в с. Повязье (рис. 2.4), которая формально тяготеет к линейности, но все-таки центричность проявляется в чистоте построения объема и геометрической правильности формы эллипса, как самой редкой разновидности чистых ротонд в истории храмовой архитектуры.

Заключение

Таким образом, автором выявлены две типологические группы храмов с общими схемами планировочных композиций храмов в Нижегородской области конца XVIII – первой половины XIX веков: линейные, которые подразделяются на традиционный тип трехчастного построения плана «корабль», двухчастные с колокольней и без колокольни; центрические, выраженные в стремлении к компактности и являющиеся ярким маркером столичных влияний в архитектуре и внедрении стиля классицизм в храмовое зодчество нижегородской области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макарий (Миролюбов, Н. К.). Памятники церковных древностей в Нижегородской губернии / сочинение архимандрита Макария. – Санкт-Петербург, 1857. – VI, II, 514 с. – (Записки Императорского археологического общества ; т. 10).
2. Иконников, А. В. Тысяча лет русской архитектуры : развитие традиций / А. В. Иконников. – Москва : Искусство, 1990. – 384 с. – ISBN 5-210-00310-8.
3. Евсина, Н. А. Русская архитектура в эпоху Екатерины II. Барокко – классицизм – неоготика / Н. А. Евсина ; ответственный редактор В. И. Тасалов ; Российская академия



наук, Российский институт искусствознания Министерства культуры Российской Федерации. – Москва : Наука, 1994. – 219 с. – ISBN 5-02-011578-9.

4. Градостроительство России середины XIX – начала XX века. [В 3 книгах]. Книга 1. Общая характеристика и теоретические проблемы / НИИ теории архитектуры и градостроительства ; под общей редакцией Е. И. Кириченко. – Москва : Прогресс-Традиция, 2001. – 340 с. – (Русское градостроительное искусство). – ISBN 5-89826-083-8.

5. Путятин, И. Е. Архитектура русских усадебных церквей в эпоху классицизма : на примере Подмоскovie : специальность 18.00.01 : диссертация на соискание ученой степени кандидата архитектуры / Путятин Илья Евгеньевич. – Москва, 1998. – 273 с. + Приложение (159 с. : ил.).

6. Яковлев, А. Н. Ротондальные храмы России XVIII – первой четверти XIX века: формирование и распространение устойчивых архитектурных типов : специальность 17.00.04 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата искусствоведения / Яковлев Алексей Николаевич. – Москва, 2022. – 31 с.

7. Свод памятников архитектуры и монументального искусства России. Брянская область / Российская академия наук, Государственный институт искусствознания Министерства культуры Российской Федерации. – Москва : Наука, 1998. – 638 с. – (Свод памятников истории и культуры России). – ISBN 5-02-011179-1.

8. Плужников, В. И. Типология объемных композиций в культовом зодчестве конца XVIII – начала XX в. на территории Брянской области / В. И. Плужников // Памятники русской архитектуры и монументального искусства. – Москва : Наука, 1983. – С. 157–198.

9. Плужников, В. И. Объемные композиции культовых построек Орловской области / В. И. Плужников // Памятники русской архитектуры и монументального искусства. – Москва : Наука, 1980. – С. 182–214.

10. Арзамас : иллюстрированный каталог памятников истории и культуры, расположенных на территории города Арзамаса / А. Л. Гельфонд [и др.]. – Нижний Новгород : Кварц, 2013. – 527 с. – ISBN 978-5-903581-91-7.

11. Каравашкин, В. А. Классицизм в храмовом зодчестве Нижегородской губернии последней четверти XVIII века / В. А. Каравашкин // Сборник трудов аспирантов и магистрантов. Архитектура. Геоэкология. Экономика / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2005. – С. 59–64.

BARINOV Dmitriy Vladimirovich, postgraduate student of the chair of architectural history and foundations of architectural design

TYPES OF PLAN COMPOSITIONS OF CHURCHES IN THE NIZHNY NOVGOROD REGION IN THE LATE 18th AND THE FIRST HALF OF THE 19th CENTURIES

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (909) 295-06-82; e-mail: dm.archirest@gmail.com

Key words: architecture of the Nizhny Novgorod region, church architecture of the Nizhny Novgorod region, plan compositions of churches, Nizhny Novgorod classicism.

The article discusses the characteristic types of plan compositions of churches built in the Nizhny Novgorod region during the late 18th and early 19th centuries. The author analyzes the types of plan compositions of church structures and identifies two fundamental architectural groups: linear and centric structures, as well as their local variations.

REFERENCES

1. Makariy (Mirolyubov N. K.). Pamyatniki tserkovnykh drevnostey v Nizhegorodskoy gubernii [Monuments of Church Antiquities in the Nizhny Novgorod Province]. sochinenie arkhimandrita Makariya. Saint Petersburg, 1857, VI, II, 514 p. (Zapiski Imperatorskogo arkhelogicheskogo obshchestva [Memoirs of the Imperial Archaeological Society]; Vol. 10).
2. Ikonnikov A. V. Tysyacha let russkoy arkhitektury : razvitie traditsiy [A Thousand Years of Russian Architecture: Development of Traditions]. Moscow, Iskusstvo, 1990, 384 p. ISBN 5-210-00310-8.
3. Evsina N. A. Russkaya arkhitektura v epokhu Ekateriny II. Barokko – klassitsizm – neogotika [Russian Architecture in the Era of Catherine II. Baroque – Classicism – Neo-Gothic]. otvetstvennyy redaktor V. I. Tasalov; Rossiyskaya akademiya nauk, Rossiyskiy institut iskusstvoznaniya Ministerstva kultury Rossiyskoy Federatsii [Russian Academy of Sciences, Russian Institute of Art History of the Ministry of Culture of the Russian Federation]. Moscow, Nauka, 1994, 219 p. ISBN 5-02-011578-9.
4. Gradostroitelstvo Rossii serediny XIX – nachala XX veka [Urban Planning in Russia in the Mid-19th – Early 20th Centuries]. V 3 knigakh. Kniga 1. Obshchaya kharakteristika i teoreticheskie problemy [General Characteristics and Theoretical Problems]. NII teorii arkhitektury i gradostroitelstva; pod obshchey redaktsiei E. I. Kirichenko. Moscow, Progress-Traditsiya, 2001, 340 p. (Russkoe gradostroitelnoe iskusstvo [Russian Urban Planning Art]). ISBN 5-89826-083-8.
5. Putyatin I. E. Arkhitektura russkikh usadebnykh tserkvey v epokhu klassitsizma : na primere Podmoskovya [Architecture of Russian Estate Churches in the Era of Classicism: A Case Study of the Moscow Region] : spetsialnost 18.00.01 : diss. ... kand. arkh. / Putyatin Ilya Evgenovich. Moscow, 1998, 273 p. + Prilozhenie [Appendix] (159 p. : il.).
6. Yakovlev A. N. Rotondalnye khramy Rossii XVIII – pervoy chetverti XIX veka: formirovanie i rasprostraneniye ustoychivyykh arkhitekturnykh tipov [Rotunda Churches of Russia in the 18th – First Quarter of the 19th Century: Formation and Distribution of Stable Architectural Types] : spetsialnost 17.00.04 : avtoref. diss. ... kand. Iskusstvovedeniya. Moscow, 2022, 31 p.
7. Svod pamyatnikov arkhitektury i monumentalnogo iskusstva Rossii. Bryanskaya oblast [Corpus of Architectural Monuments and Monumental Art of Russia. Bryansk Region]. Rossiyskaya akademiya nauk, Gosudarstvennyy institut iskusstvoznaniya Ministerstva kultury Rossiyskoy Federatsii [Russian Academy of Sciences, State Institute of Art History of the Ministry of Culture of the Russian Federation]. Moscow, Nauka, 1998, 638 p. (Svod pamyatnikov istorii i kultury Rossii [Corpus of Historical and Cultural Monuments of Russia]). ISBN 5-02-011179-1.
8. Pluzhnikov V. I. Tipologiya obemnykh kompozitsiy v kultovom zodchestve kontsa XVIII – nachala XX v. na territorii Bryanskoy oblasti [Typology of Volumetric Compositions in Cult Architecture of the Late 18th – Early 20th Century in the Territory of the Bryansk Region]. Pamyatniki russkoy arkhitektury i monumentalnogo iskusstva [Monuments of Russian Architecture and Monumental Art]. Moscow, Nauka, 1983, P. 157–198.
9. Pluzhnikov V. I. Obemnye kompozitsii kultovykh postroek Orlovskoy oblasti [Volumetric Compositions of Cult Buildings in the Oryol Region]. Pamyatniki russkoy arkhitektury i monumental'nogo iskusstva [Monuments of Russian Architecture and Monumental Art]. Moscow, Nauka, 1980, P. 182–214.
10. Gelfond A. L., [et al.] Arzamas : illyustrirovanny katalog pamyatnikov istorii i kultury, raspolozhennykh na territorii goroda Arzamasa [Arzamas: Illustrated Catalog of Historical and Cultural Monuments Located in the Territory of the City of Arzamas]. Nizhny Novgorod, Kvarts, 2013, 527 p. ISBN 978-5-903581-91-7.
11. Karavashkin V. A. Klassitsizm v khramovom zodchestve Nizhegorodskoy gubernii posledney chetverti XVIII veka [Classicism in the Church Architecture of the Nizhny Novgorod Province in the Last Quarter of the 18th Century]. Arkhitektura. Geoekologiya. Ekonomika



[Architecture. Geoecology. Economics]. Sbornik trudov aspirantov i magistrantov. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t [Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering]. Nizhny Novgorod, 2005, P. 59–64.

© **Д. В. Баринов, 2026**

Получено: 06.05.2026 г.



УДК 72.01:726

Шифр научной специальности 2.1.12

Д. А. ПИРОГОВ, специалист, управление профессиональной оценки и развития квалификаций

АРХИТЕКТУРА БЫСТРОВОЗВОДИМЫХ ОБЪЕКТОВ РЕЛИГИОЗНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации» (ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России»).

Россия, 119331, г. Москва, проспект Вернадского, д. 29.

Тел.: (910) 798-76-99; эл. почта: daniilspirogov@yandex.ru

Ключевые слова: быстровозводимая архитектура, объекты религиозного назначения, архитектура для беженцев, социальная инфраструктура, пространство сакрального.

В статье рассматриваются особенности и проблемы проектирования и строительства быстровозводимых объектов религиозного назначения. Анализируются принципы создания культовых сооружений (часовен, мечетей, синагог и молевых павильонов), возводимых с использованием низкзатратных, перерабатываемых и локальных материалов. Проанализированы примеры мировой практики, в которых применяются модульные, каркасные, оболочковые, пневматические и тентовые конструктивные системы. Особое внимание уделяется вопросам взаимосвязи традиционного и новаторского в таких проектах, а также адаптации архитектурных решений к культурному контексту.

Введение

Катастрофы и экстремальные ситуации постоянно бросают вызов уже сложившимся архитектурным решениям, формируют новые условия для их трансформации и в ряде случаев задают новый вектор развития архитектурной мысли.

Архитектура быстрого реагирования (АБР) способна ответить проблемам сегодняшнего дня, способна меняться и гибко встраиваться в сложившиеся условия [1]. Принципы АБР применимы к любой архитектурной типологии, которой требуются изменения, формируемые социально-политическим контекстом, катастрофами техногенного или природного характера.

В настоящий момент актуальность и востребованность имеют все типы быстровозводимых объектов социальной инфраструктуры (БОСИ), в том числе, объекты религиозного назначения. Данные объекты активно применяются в лагерях беженцев, в военных лагерях, пунктах временного размещения, вахтовых поселениях, арктических исследовательских станциях, поселениях с небольшой численностью населения, удаленных от крупных городов и не имеющих инфраструктуры.

В отличие от других БОСИ, объекты религиозного назначения имеют большую связь с традицией, что напрямую отражается в их пространственной и планировочной структуре.

Методы и материалы

Исследование основано на анализе отечественных и зарубежных публикаций по архитектуре быстрого реагирования и временных сооружений, а также на примерах реализованных быстровозводимых объектов религиозного назначения. В работе использован комплекс взаимодополняющих методов, позволивших выявить архитектурные, конструктивные и культурные особенности формирования быстровозводимых объектов религиозного назначения.

Применен аналитический метод для изучения теоретических источников и реализованных проектов отечественной и зарубежной практики. Сравнительный типологический и морфологический анализ использовались для сопоставления пространственных решений культовых сооружений разных конфессий и конструктивных систем – каркасных, оболочковых, пневматических и модульных. Проанализированы конкретные примеры мировой практики – «Картонный собор» Шигеру Бана, временная церковь *Colab-19* в Боготе, мобильные и контейнерные храмы.

Результаты исследования

Выявлены основные особенности формирования архитектуры быстровозводимых объектов религиозного назначения:

1. Синтез традиционного и новаторского. К объектам религиозного назначения в историческом контексте применимы такие термины как «долговечность», «вневременность», «основательность». В статье рассматривается та категория объектов религиозного назначения, при описании которой можно пользоваться понятиями «быстровозводимость», «реакционность», «легкость», «адаптируемость», «временность». Именно в этом контрасте появляются смелые, уникальные решения, скрывающие за чистотой композиционного и планировочного решения глубокие подтексты, касающиеся типологического, композиционно-художественного, функционально-планировочного, конструктивного и социально-психологического аспекта.

Архитектурная типология, для которой свойственны традиционализм в образности, пространственной организации, художественном и пластическом языке, а также архитектурная семантика, свойственная признакам конкретных конфессий, сегодня в мировой архитектурной практике переживает серьезные трансформации и новую степень осмысления. В католической и протестантской религиозной архитектуре Европы и США за 20 век традиционная пространственная организация была переосмыслена и во многом упрощена, случился ощутимый переход к большей архитектурной и технологической свободе и открытости к экспериментам. В современной исламской архитектуре можно отметить стремление к более простым и чистым формам (купола, своды), большому масштабу объектов. Православную, буддийскую и иудаистскую архитектуру трансформации и изменения пространственной организации и образности коснулись в меньшей степени, в современной архитектуре данных конфессий превалирует стремление к историзму.

На сегодняшний день в мире возникает все больше ситуаций, в которых требуются быстрые, временные решения – это затрагивает и объекты религиозного назначения. Исторические религиозные объекты выполняли роль градостроительных доминант [2]; в условиях малоэтажной застройки в сельской местности или в лагерях беженцев, где обычно и возводятся быстровозводимые

религиозные сооружения, эта роль за ними остается, что может сильно влиять на выбор расположения объекта в градостроительном контексте поселения.

В быстровозводимой архитектуре религиозного назначения трансформации и изменения, связанные с упрощением пространственной структуры, технологическим новаторством и превалированием формы конструкции над традиционными принципами организации композиции, доведены до возможного максимума [3]. Основные принципы архитектурного формирования объектов религиозного назначения, единые для монотеистических конфессий:

- формирование зального пространства с большой высотой этажа;
- ориентация на сторону света;
- в ряде случаев: построение композиции на контрасте объема самого объекта (церковь, часовня / мечеть) и тонкого вертикального объема (звонница, колокольня / минарет);
- композиция плана централизованно-блочная или компактная.

Следует отметить, что в статье рассмотрены только примеры быстровозводимой религиозной архитектуры христианства, ислама, буддизма и иудаизма; быстровозводимые объекты других религий и верований (зороастризм, все направления нью-эйджа, тотемизм, язычество) не рассматриваются за недостатком примеров.

2. Соседство сакрального и профанного. В быстровозводимой архитектуре религиозного назначения наиболее заметно сталкиваются полюса сакрального и профанного: с одной стороны – технологическое новаторство, временный характер сооружения, применение сборно-разборной конструкции из легких модульных или типовых элементов, не каноничные условия и атипичная среда (лагеря беженцев, пункты временного размещения, удаленные поселения), с другой – прямое назначение объекта, функция отправления культа и ритуала. Граница между «мирским» и «священным» в таких объектах максимально обнажается: часто в роли временного объекта религиозного назначения может быть навес, тент или оболочковая структура. При этом материальный аскетизм может рассматриваться как свойство сакрального, а простота формы – как связь с архетипическим образом первых культовых сооружений.

В атипичных условиях быстровозводимые объекты религиозного назначения часто становятся смысловым и пространственным ядром для общины (сообщества) – местом, где концентрируется духовная жизнь. Нередко такие объекты выполняют функцию центров психологической и социальной поддержки, функцию воспитания и образования.

3. Особенности объемно-пространственной композиции. В каркасных христианских церквях: призматический объем с двухскатной крышей либо с несколькими ярусами двухскатных крыш; в ряде случаев с колокольней или звонницей со стороны входа (западного фасада).

В тентовых, пневматических и оболочковых христианских церквях и часовнях – купольная, призматическая либо цилиндрическая форма. Звонница – отдельно стоящий вертикальный пластинчатый объем из каркаса.

В оболочковых и каркасных мечетях – купольная форма, минарет – отдельно стоящий объем из каркаса.

В модульных, мобильных мечетях – прямоугольная призматическая форма с плоской либо двухскатной крышей. В мобильных объектах имеется потенциал к трансформации и расширению молельного зала в 2-3 раза. Потенциал

**К СТАТЬЕ Д. А. ПИРОГОВА «АРХИТЕКТУРА БЫСТРОВОЗВОДИМЫХ
ОБЪЕКТОВ РЕЛИГИОЗНОГО НАЗНАЧЕНИЯ»**

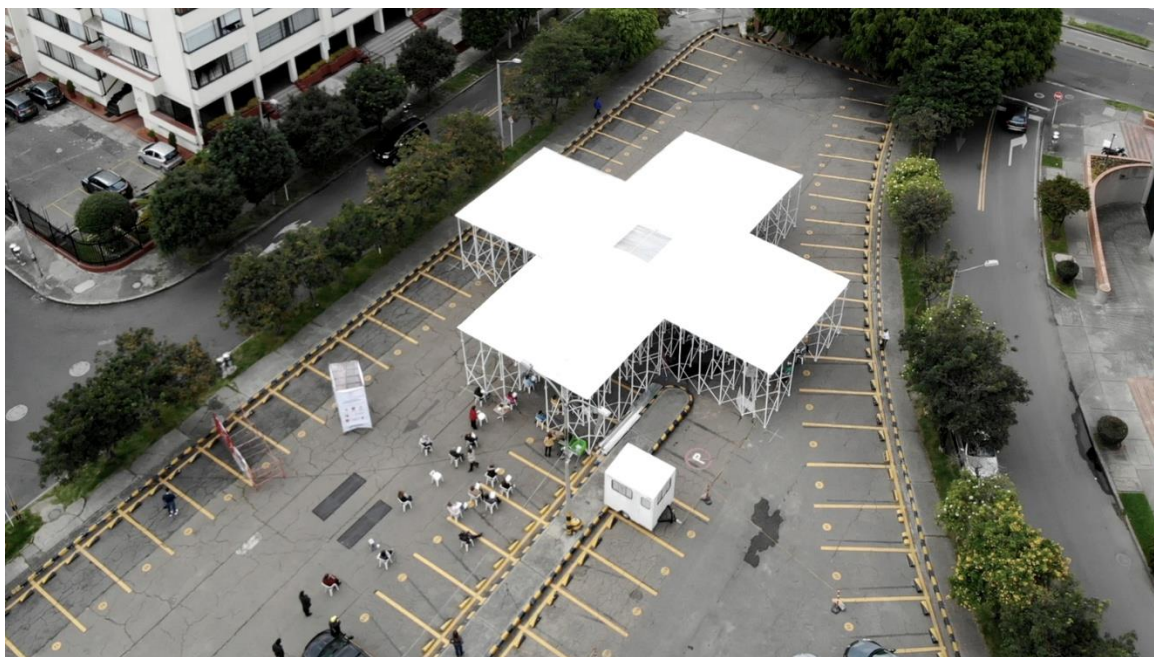


Рис. 1. Временная часовня Креста Альгамбры, проектные бюро *Alsar Atelier*, *GB Urban Studio*, *Sociedad Colombiana de Arquitectos*, Колумбия, 2021



Рис. 2. Церковь из ЛСТК, компания-производитель *Coastal steel structures*
[Источник фото: coastalsteelstructures.com]



Рис. 3. «Картонный собор», архитектор Шигеру Бан, Крайстчерч, Новая Зеландия, 2013
[Источник фото: archdaily.com]



Рис. 4. Мобильные объекты религиозного назначения
[Фото из открытых источников]



быстровозводимых религиозных сооружений кроется во многом в возможности трансформации, динамическом изменении формы, а также в эпизодической замене функции [4].

4. Планировочные особенности. В каркасных христианских церквях: сохранение разделения на притвор, храмовую часть и алтарь; композиция плана прямоугольная или крестообразная, развита по оси запад-восток. Звонница или колокольня расположены отдельно или встроены в структуру объекта.

В тентовых, пневматических и оболочковых христианских церквях и часовнях – единое зальное пространство (с местами для сидения или без, в зависимости от конфессии); композиция плана круглая, крестообразная, многоугольная, прямоугольная.

В модульных, оболочковых, мобильных мечетях: единое зальное пространство либо с разделением на мужской и женский молельный залы. Композиция плана приближена к квадрату либо развита по оси с ориентацией на киблу (направление на священную Каабу в Мекке).

В каркасных и модульных пагодах: композиция плана стремится к квадрату либо кругу; единое зальное пространство.

5. Конструктивно-технологические особенности. Основные быстровозводимые конструктивные системы, применяемые при строительстве объектов религиозного назначения:

- оболочковая;
- пневматическая;
- каркасная;
- мобильная.

В период пандемии *Covid-19* в 2020–2021 гг. необходимость создавать зальные пространства с хорошей вентиляцией привела к расширению спектра применения тентовых и пневматических конструкций. Например, проектные бюро *Alsar Atelier*, *GB Urban Studio*, *Sociedad Colombiana de Arquitectos* спроектировали временную крестообразную церковь «Крест Альгамбры» (рис. 1 цв. вклейки) из материалов вторичного использования (опалубка для бетона), чтобы местное сообщество могло безопасно проводить богослужения во время пандемии коронавируса в Боготе в Колумбии [5]. Обращаясь к крестообразной форме плана, архитекторы, применяющие современные материалы и минималистичные приемы в отделке и конструкции, сохранили архетипичную для христианских культовых сооружений планировочную структуру.

Тентовые и пневматические конструкции сильно расширяют возможности при создании выразительного и визуально эффектного силуэта объекта. Примером может быть церковь *Andreas Paulus Petrus Parish*, церковь в Нидерландах, состоящая из нескольких взаимопроникающих двояковыгнутых оболочек. В то же время, имеются примеры пневматических религиозных сооружений, буквально повторяющих образность, силуэт и структуру традиционных исторических храмов, и даже повторяет детали (например, готические витражи). Такой постмодернистский ход отсылает к игровой и бутафорской эстетике. Такие «надувные церкви» можно приобрести в интернет-магазине или взять в аренду на короткий срок. В военных лагерях применяются воздухоопорные мобильные церкви и мечети простой геометрии, чаще всего с цилиндрическим или многоугольным сводом.

На сегодняшний день в странах Европы активно возводятся каркасные церкви из ЛСТК и ЛМК, существуют типовые проекты с предварительной сборкой конструкций (рис. 2 цв. вклейки).

Исторически предшественниками образцами каркасных быстровозводимых объектов религиозного назначения можно считать средневековые ставкирки в странах Скандинавии, буддийские пагоды в Азии, а также протестантские церкви первых переселенцев в Северной Америке. В ставкирках и пагодах применялся деревянный каркас с бревенчатыми или брусовыми стойками и балками, в протестантских молельных домах Северной Америки – деревянный каркас из досок и брусьев, аналогичными примерами могут быть летние сооружения на территории храмов в России [6, 7]. В наше время растет популярность картонных каркасов. Один из известнейших быстровозводимых объектов религиозного назначения – Картонный собор авторства Шигеру Бана (рис. 3 цв. вклейки). Шигеру Бан в своей архитектурной практике большое внимание уделяет объектам из обработанных круглых картонных труб [8]. «Картонный собор» был расположен на месте разрушенного исторического кафедрального собора, пострадавшего от землетрясения. Новый объект должен был стать символом новой жизни, устойчивости и умения адаптироваться к новым обстоятельствам.

В военных лагерях, в регионах крайнего севера, а также в дни крупных религиозных праздников применяются мобильные объекты религиозного назначения (рис. 4 цв. вклейки) [9]. Наиболее распространенными являются молитвенные залы, встроенные в кузова крупногабаритной техники. Для увеличения площади в три раза, при разворачивании объекта, модуль раздвигается симметрично в ширину, вход осуществляется по выдвижной лестнице. Также в роли мобильных религиозных сооружений (христианских, иудаистских и мусульманских) активно применяются морские контейнеры длиной до 12 метров (возможно совмещение нескольких контейнеров для увеличения площади) [10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аширова, М. В. Архитектура быстрого реагирования: концепция временного мобильного жилья в условиях чрезвычайных ситуаций / М. В. Аширова, Г. Н. Айдарова. – Текст : электронный // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 2 (36). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/arhitektura-bystrogo-reagirovaniya-kontseptsiya-vremennogo-mobilnogo-zhilya-v-usloviyah-chrezvychaynyh-situatsiy> (дата обращения: 18.12.2023).

2. Гельфонд, А. Л. Формы пространственного взаимодействия культовых и высотных зданий в архитектурной среде городов (зарубежный опыт) / А. Л. Гельфонд, Е. М. Генералова // Academia. Архитектура и строительство. – 2023. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formy-prostranstvennogo-vzaimodeystviya-kultovyh-i-vysotnyh-zdaniy-v-arhitekturnoy-srede-gorodov-zarubezhnyy-opyt> (дата обращения: 16.03.2025).

3. Тугбаева, Ю. В. Строительство быстровозводимых церквей / Ю. В. Тугбаева, Н. М. Якушев // Выставка инноваций – 2016 : сборник материалов XXI Республиканской выставки-сессии студенческих инновационных проектов, Ижевск, 13 апреля 2016 года / ответственный за выпуск: Тюрин А.П. – Ижевск, 2016. – С. 109–111. – EDN WBHMDJ.

4. Пирогов, Д. А. Опыт традиционной временной архитектуры в работе с объектами быстровозводимой социальной инфраструктуры. Часть 1 / Д. А. Пирогов // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2023. – № 1. – С. 205–209. – EDN UESTEL. (K2).



5. Temporary Chapel Alhambra's Cross / Colab-19 + Sociedad Colombiana de Arquitectos + Alsar Atelier + GB Urban Studio. – Режим доступа: <https://www.archdaily.com/960187/temporary-chapel-alhambras-cross-colab-19-plus-sociedad-colombiana-de-arquitectos> (дата обращения: 09.10.2025).

6. Борисов, С. В. Зарубежный опыт строительства быстровозводимых храмов в условиях северных территорий (на примере Канады) : материалы Международной научно-практической конференции, 7–11 апреля 2014 г. : сборник статей / С. В. Борисов. – Москва, 2014. – С. 480–483.

7. Борисов, С. В. Быстровозводимые летние трапезные для храмовых комплексов / С. В. Борисов // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. – 2017. – №. 1. – С. 563–567.

8. Shigeru Ban completes Cardboard Cathedral in New Zealand // ArchDaily. – URL: <https://www.archdaily.com/413224/shigeru-ban-completes-cardboard-cathedral-in-new-zealand> (дата обращения: 01.08.2025).

9. Борисов, С. В. Православные мобильные храмы: история и современность / С. В. Борисов // Вестник ИРГТУ. – 2014. – № 3 (86). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pravoslavnye-mobilnye-hramy-istoriya-i-sovremennost> (дата обращения: 01.10.2025).

10. Славгородский, С. А. Перспективы использования морских контейнеров в строительстве при создании инфраструктуры в условиях крайнего севера / С. А. Славгородский // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции. – Сургут, 2016. – С. 113.

PIROGOV Daniil Aleksandrovich, specialist, department of professional assessment and qualification development

ARCHITECTURE OF RAPIDLY ERECTED RELIGIOUS STRUCTURES

Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation (TsNIIP Ministry of Construction of Russia).

29, Vernadskogo Prospect, Moscow, 119331, Russia.

Tel.: (910) 798-76-99; e-mail: daniilspirogov@yandex.ru

Key words: rapidly erected architecture, religious facilities, architecture for refugees, social infrastructure, sacred space.

This article examines the specific features and challenges in the design and construction of rapidly erected religious facilities. It focuses on the development of worship spaces-such as chapels, mosques, synagogues, and prayer pavilions-built using low-cost, recyclable, and locally sourced materials. The study analyzes global case studies employing modular, frame, shell, pneumatic, and tensile structural systems. Particular attention is given to the interplay between traditional and innovative approaches in such projects, as well as the adaptation of architectural solutions to diverse cultural contexts.

REFERENCES

1. Ashirova M. V., Aidarova G. N. Arkhitektura bystrogo reagirovaniya: kontseptsiya vremennogo mobilnogo zhilya v usloviyakh chrezvychaynykh situatsiy [Architecture of rapid response: the concept of temporary mobile housing in emergency situations]. Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Bulletin of Kazan State University of Architecture and Engineering]. 2016, № 2 (36). URL:



<https://cyberleninka.ru/article/n/arkhitektura-bystrogo-reagirovaniya-kontseptsiya-vremennogo-mobilnogo-zhilya-v-usloviyah-chrezvychaynyh-situatsiy> (accessed: 18.12.2023).

2. Gelfond A. L., Generalova E. M. Formy prostranstvennogo vzaimodeystviya kul'tovykh i vysotnykh zdaniy v arkhitekturnoy srede gorodov (zarubezhnyy opyt) [Forms of spatial interaction of religious and high-rise buildings in the architectural environment of cities (foreign experience)]. Academia. Arkhitektura i stroitelstvo [Academia. Architecture and Construction]. 2023, № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formy-prostranstvennogo-vzaimodeystviya-kul'tovykh-i-vysotnykh-zdaniy-v-arkhitekturnoy-srede-gorodov-zarubezhnyy-opyt> (accessed: 16.03.2025).

3. Tugbaeva Yu. V., Yakushev N. M. Stroitelstvo bystrovozdimykh tserkvey [Construction of rapidly erected churches]. Vystavka innovatsiy – 2016 [Innovation Exhibition – 2016] : sbornik materialov XXI Respublikanskoy vystavki-sessii studencheskikh innovatsionnykh proektov, Izhevsk, 13 aprelya 2016 goda. Izhevsk, 2016, P. 109–111. EDN WBHMDJ.

4. Pirogov D. A. Opyt traditsionnoy vremennoy arkhitektury v rabote s obektami bystrovozdimoy sotsialnoy infrastruktury. [Experience of traditional temporary architecture in working with rapidly erected social infrastructure facilities]. Chast 1. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2023, № 1, P. 205–209. EDN UESTEL.

5. Temporary Chapel Alhambra's Cross / Colab-19 + Sociedad Colombiana de Arquitectos + Alsar Atelier + GB Urban Studio. URL: <https://www.archdaily.com/960187/temporary-chapel-alhambras-cross-colab-19-plus-sociedad-colombiana-de-arquitectos> (accessed: 09.10.2025).

6. Borisov S. V. Zarubezhny opyt stroitelstva bystrovozdimykh khramov v usloviyakh severnykh territoriy (na primere Kanady) [Foreign experience in the construction of rapidly erected churches in the conditions of northern territories (case study of Canada)] : materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 7–11 aprelya 2014 g. : sbornik statey. Moskovskiy arkhitekturny in-t (gos. akad.). Moscow, 2014, P. 480–483.

7. Borisov S. V. Bystrovozdimye letnie trapeznye dlya khramovykh kompleksov [Rapidly erected summer refectories for temple complexes]. Dalniy Vostok: problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa [Far East: problems of development of the architectural and construction complex]. 2017, № 1, P. 563–567.

8. Shigeru Ban completes Cardboard Cathedral in New Zealand. ArchDaily. URL: <https://www.archdaily.com/413224/shigeru-ban-completes-cardboard-cathedral-in-new-zealand> (accessed: 01.08.2025).

9. Borisov S. V. Pravoslavnye mobilnye khramy: istoriya i sovremennost [Orthodox mobile churches: history and modernity]. Vestnik IrGTU [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2014, № 3 (86). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pravoslavnye-mobilnye-hramy-istoriya-i-sovremennost> (accessed: 01.10.2025).

10. Slavgorodskiy S. A. Perspektivy ispolzovaniya morskikh konteynerov v stroitelstve pri sozdanii infrastruktury v usloviyakh kraynego severa [Prospects for the use of sea containers in construction when creating infrastructure in the conditions of the Far North]. Materialy II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Surgut, 2016, P. 113.

© Д. А. Пирогов, 2026

Получено: 05.12.2025 г.

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ЦИФРОВАЯ ПОДДЕРЖКА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ

УДК 004.42

Н. Т. СУХАНОВА, канд. пед. наук, доц. кафедры информационных систем и технологий; **М. А. ЗИМИН**, магистрант кафедры информационных систем и технологий

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ КВАНТОВАНИЯ ДЕТЕКТОРОВ ОБЪЕКТОВ В МОБИЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-54-92; эл. почта: ntsuhanova@gmail.com

Ключевые слова: техническое зрение, компьютерное зрение, детекция объектов, нейронные сети, квантование моделей, мобильные системы, реальное время, обработка изображений, инференс, препроцессинг, постпроцессинг.

В статье рассматриваются методы детекции объектов для их интеграции в мобильные системы технического зрения (СТЗ). Основное внимание уделяется моделям семейства YOLO, процедуры квантования параметров которых дают возможность адаптировать высокопроизводительные детекторы для работы на устройствах, которые имеют ограниченные вычислительные ресурсы. Представлена сравнительная оценка трех вариантов модели распознавания объектов YOLOv8n: без квантования, с частичным и с полным целочисленным квантованием. Эксперименты проводились на смартфоне Samsung Galaxy A53 5G в режиме обработки видеопотока в реальном времени. Установлено, что полное целочисленное квантование не дает ожидаемого ускорения и, напротив, снижает общую производительность за счет возрастания затрат на подготовку входных данных. Одновременно наблюдается резкое падение качества распознавания, модель перестает обнаруживать большинство объектов в кадре. Вариант с частичным квантованием показал результаты, практически идентичные базовой модели, и признан наиболее сбалансированным решением. В работе демонстрируется возможность трансформации мобильного устройства в отдельный модуль технического зрения с детерминированным временем отклика. Обосновывается для одностадийных детекторов выбор оптимальных параметров квантования, работающих в составе распределенных систем технического зрения, это, в свою очередь, позволяет минимизировать вычислительную нагрузку без потери достоверности данных. Рассмотренная методология может найти свое применение в процессе разработки мобильных систем мониторинга, промышленной инспекции и сервисной робототехники.

Введение

Современная парадигма развития систем технического зрения (СТЗ) направлена, в частности, на перенос вычислительной нагрузки на сенсорные узлы, что обуславливает актуальность разработки мобильных приложений с интегрированными алгоритмами распознавания объектов. Реализация инференса на конечном устройстве (*edge computing*) позволяет минимизировать временные



задержки при обработке видеопотока и обеспечить функциональную устойчивость системы в условиях нестабильного канала связи.

В качестве базового алгоритмического решения для подобных СТЗ эффективно применение детекторов *YOLO* (*You Only Look Once*) [1, 2]. Одноступенчатая архитектура данных нейронных сетей, которая интегрирует этапы регрессии координат ограничивающих рамок, локализацию и классификацию объектов в единый вычислительный цикл, обеспечивая тем самым оптимальный баланс между вычислительной сложностью и точностью локализации объектов. Использование методов оптимизации графа вычислений и квантования параметров моделей *YOLO* позволяет трансформировать мобильное устройство в инструмент технического зрения, способный функционировать в контурах реального времени с заданными метриками достоверности распознавания.

Однако использование на мобильных устройствах нейросетевых моделей сталкивается с трудностями, связанными с незначительными вычислительными ресурсами, которыми они располагают. При этом приходится делать выбор, связанный либо с точностью распознавания объектов, либо со скоростью вычислений [3, 4].

Одним из ключевых инструментов решения данной проблемы является квантование – перевод весовых коэффициентов и активаций нейронной сети из 32-битного представления с плавающей точкой в 16- или 8-битное. Квантование позволяет выполнять инференс на целочисленной арифметике, которая реализуется на мобильном устройстве эффективнее, чем операции с плавающей точкой, и дает дополнительный выигрыш в виде уменьшения размера модели [5].

В статье приводится сравнительная оценка трех конфигураций модели *YOLOv8n* при использовании в мобильном приложении на платформе *Android* в режиме реального времени. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- экспорт исходной модели в три формата *TFLite*, соответствующие уровням точности *Float 32*, *Float 16* и *Int8*;
- измерение производительности каждой конфигурации по следующим метрикам: среднее время инференса, частота кадров и потребления оперативной памяти;
- оценка точности детекции на наборе тестовых изображений;
- определение конфигурации, обеспечивающей оптимальный баланс между скоростью и точностью работы.

Материалы и методы

Проблема существующих исследований

Сохан М., СайРам Т., РамиРедди К. В. в обзорной работе по архитектуре *YOLOv8* [6] показывают, что ключевым отличием этой модели стала разделенная голова детекции (*Decoupled-Head*), которая разделяет задачи классификации и регрессии. Это позволяет ветвям обучаться независимо, исключая взаимное влияние и повышая точность предсказаний. Компактная конфигурация *YOLOv8n* с 3,2 млн параметров и точностью 37,3 % *mAP* позиционируется авторами как оптимальная для маломощных платформ. В свою очередь, Небаба и Марков, исследуя *YOLO*-архитектуры в мобильных системах, определили порог реального времени – не менее 25 кадров в секунду (*FPS*) [3].



Джейкоб Б., Клигис С., Чен Б. и др. показали, что перевод модели в формат *Int8* ускоряет вычисления на мобильном устройстве, однако для компактных моделей такое квантование без специальной подготовки приводит к заметной потере точности [5]. Мун Х.-Ч., Ли С., Чон Дж., Ким С. [7] установили конкретную причину этой проблемы применительно к *YOLO*-детекторам: при конвертации в *Int8* разные части модели работают в несовместимых числовых диапазонах, из-за чего детектор перестает находить объекты, вплоть до полного отказа детекции, что авторы обосновали и доказали, в том числе, для *YOLOv8n*.

В исследовании Ли З., Паолиери М., Голубчик Л. [8] было доказано, что теоретическое количество вычислительных операций (*Flops*) не позволяет точно предсказать реальную скорость работы нейросети. Ошибка в таких прогнозах может достигать 43 %, что делает метрику *Flops* ненадежной. Однако данная работа фокусировалась только на задачах классификации. В то же время стандартная оценка детекторов на наборе данных *MS COCO*, описанная в статье Лин Т.-Й., Майр М., Белонжи С. и др. [9], не отражает специфику работы мобильных устройств в режиме реального времени. Таким образом, тестирование трех уровней квантования *YOLOv8n* непосредственно на платформе *Android* заполняет этот пробел и определяет актуальность данной статьи.

Описание модели и эксперимента

В качестве объекта исследования выбрана *YOLOv8n*, наиболее компактная конфигурация в семействе *YOLOv8* [10]. Выбор данной модели обусловлен ее ориентацией на мобильные платформы при сохранении конкурентоспособной точности. Исходная модель, предобученная на наборе данных *MS COCO*, была конвертирована в формат *TensorFlow Lite* в трех вариантах: без потери точности (*Float 32*), с квантованием весов до 16 бит (*Float 16*) и с полным 8-битным целочисленным квантованием (*INT8*) методом *post-training quantization*.

Эксперименты проводились на смартфоне *Samsung Galaxy A53 5G*, оснащенный процессором *Exynos 1280 (GPU Mali-G68)* и 8 ГБ оперативной памяти, версия *Android 15*. Тестирование на единственном устройстве позволило исключить влияние аппаратных различий на итоговые показатели.

Оценка быстродействия проводилась в режиме обработки видеопотока с использованием *GPU*-делегата. Для каждой конфигурации обрабатывалась последовательность из 300 кадров; при этом первые 30 итераций исключались из расчетов для стабилизации работы графического ускорителя. Задержка измерялась на уровне системного таймера с наносекундной точностью, а потребление ресурсов оценивалось по объему динамически выделяемой нативной памяти. Целевым ориентиром производительности принято минимум 25 *FPS* [3].

Для оценки качества детекции сформирован тестовый набор из 20 изображений выборки *MS COCO* [7]. Выборка охватывает четыре типичных бытовых сценария (кухня, рабочий стол, жилая комната и улица), что позволяет проверить устойчивость модели к разным условиям освещения и плотности объектов. Объекты считались обнаруженными при пороге уверенности (*confidence threshold*) выше 0,45. Основными метриками оценки служат точность (*precision*) и полнота (*recall*), характеризующие долю верных срабатываний и способность модели находить все целевые объекты соответственно.



Анализ результатов

В данной статье представлены результаты экспериментального исследования. Сводные данные по временным затратам на различных этапах обработки кадра приведены в табл. 1.

Таблица 1

Временные характеристики и потребление памяти различными конфигурациями модели

| Конфигурация | Инференс, мс | Препроцессинг, мс | Постпроцессинг, мс | Общее время, мс | FPS | RAM, Мб |
|--------------|--------------|-------------------|--------------------|-----------------|-------|---------|
| Float32 | 39,39 | 13,53 | 6,91 | 60,64 | 16,49 | 75,3 |
| Float16 | 40,06 | 13,60 | 6,89 | 61,37 | 16,29 | 75,5 |
| Int8 | 41,96 | 38,50 | 1,69 | 82,74 | 12,09 | 74,1 |

Анализ данных табл. 1 выявил снижение производительности конфигурации *Int8* (падение *FPS* на 36,4 % относительно *Float 32*). Детальный разбор стадий обработки показал, что основным препятствием для роста скорости стал этап препроцессинга, накладные расходы на который кратно возрастают при использовании целочисленного квантования. Это подтверждает, что теоретический выигрыш от быстрого инференса, описанный в [5], может быть полностью нивелирован затратами на подготовку входных данных. При этом разница в производительности между конфигурациями *Float 32* и *Float 16* является статистически незначимой.

График на рис. 1 показывает критическое доминирование этапа препроцессинга в конфигурации *Int8*. В отличие от *Float*-версий, где распределение ресурсов остается сбалансированным, в 8-битной модели время подготовки данных кратко превышает время самого инференса. Также стоит отметить, что ни одна из конфигураций не достигла порога в 25 *FPS*, необходимого для плавного восприятия видеопотока в реальном времени.

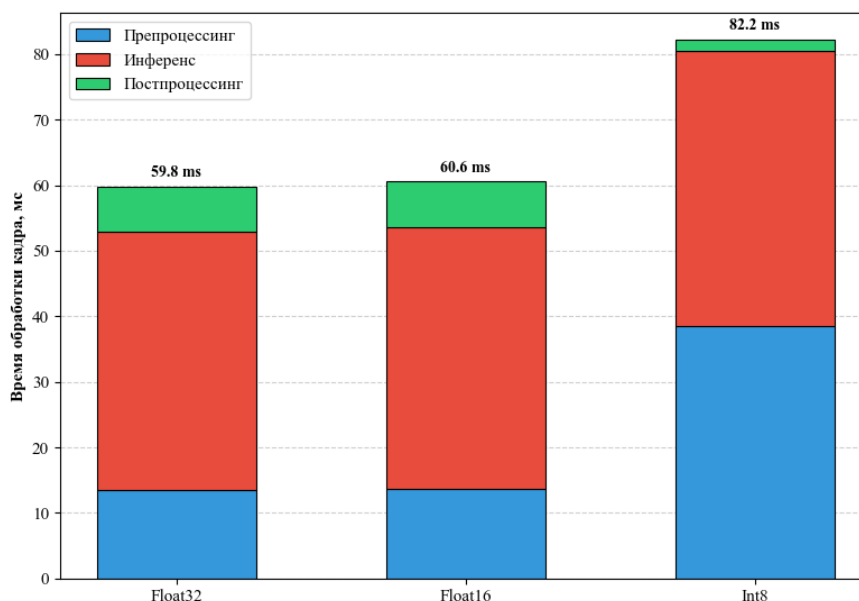


Рис. 1. Структура временных затрат на обработку одного кадра видеопотока



В табл. 2 приводятся сравнительный анализ точности детекции объектов на тестовой выборке.

Таблица 2

Сравнение точности детекции объектов на тестовой выборке

| Конфигурация | <i>Precision</i> | <i>Recall</i> | <i>F1-score</i> |
|----------------|------------------|---------------|-----------------|
| <i>Float32</i> | 0,964 | 0,380 | 0,545 |
| <i>Float16</i> | 0,966 | 0,394 | 0,560 |
| <i>Int8</i> | 0,833 | 0,141 | 0,241 |

Сравнительный анализ точности в табл. 2 фиксирует стабильность метрик для формата *Float16*, однако для *Int8* наблюдается катастрофическое падение полноты детекции (0,141). Это означает пропуск более 85 % объектов, что экспериментально подтверждает выводы Муна и др. [7] о деградации данной архитектуры при стандартном квантовании.

Представленная на рис. 2 диаграмма иллюстрирует критическую деградацию характеристик модели в формате *Int8*. При сохранении относительно высоких показателей точности значение полноты стремится к минимуму. Для обеспечения работоспособности модели в формате *Int8* необходимо применение *quantization-aware training* [7].

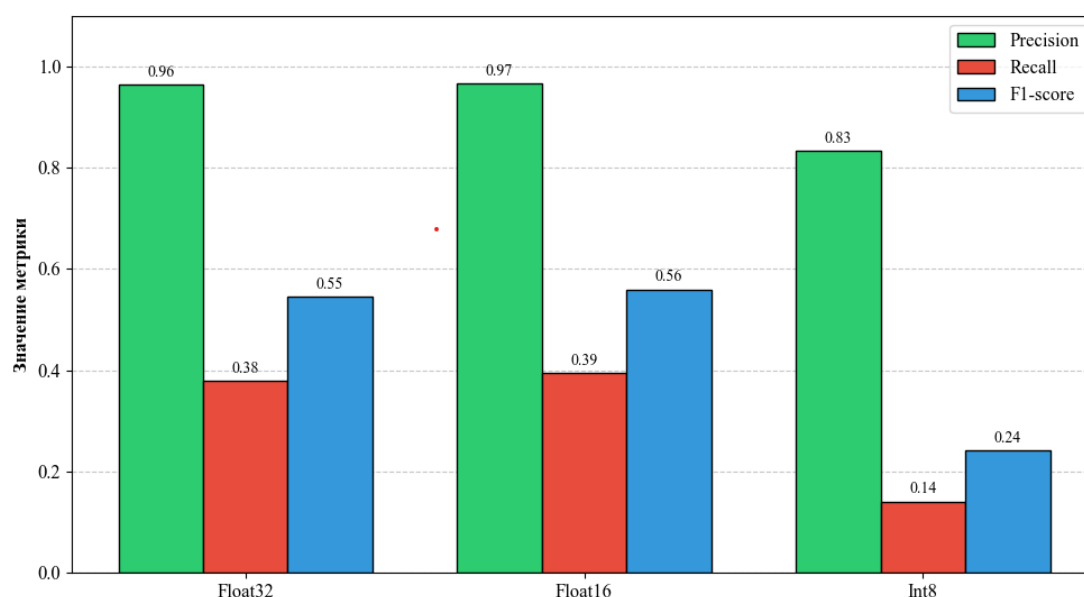


Рис. 2. Сравнение метрик точности моделей при квантовании

Заключение

Проведенное исследование методов оптимизации нейросетевых детекторов для мобильных систем технического зрения (СТЗ) позволило сформулировать следующие выводы:

Установлено, что формат *Int8*, теоретически обеспечивающий наибольшее ускорение, на практике продемонстрировал худший результат. Время подготовки входных данных возросло до 38,50 мс против 13,53 мс у модели *Float32*, из-за чего общая производительность снизилась на 26,7 %. Помимо падения скорости, полнота детекции (*Recall*) упала до 0,141, то есть модель не обнаруживает более



85 % объектов на изображении. В таком виде модель непригодна для работы в режиме реального времени. Возможным решением является применение *quantization-aware training*.

Наиболее сбалансированной конфигурацией для мобильных СТЗ признан формат *Float16*. Он сохраняет точность на уровне базовой модели, а разница в скорости с *Float32* составляет менее 1,3 %. При этом ни одна из конфигураций не достигла порогового значения в 25 FPS, наилучший результат составил 16,49 FPS у модели *Float32*. Таким образом, для достижения плавного видеопотока необходима дополнительная оптимизация препроцессинга, в частности, перенос этого этапа на нативный код.

Научная значимость работы заключается в анализе влияния этапа предобработки данных на общую производительность мобильных систем компьютерного зрения. Выполненный подбор методов нейросетевых архитектур под ограниченные возможности мобильных устройств дополняет методологию проектирования современных СТЗ.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой методов квантования с учетом особенностей мобильных платформ и оптимизацией вычислительно затратных этапов обработки данных. Это позволит минимизировать потери, связанные с энергозатратами и скоростью обработки изображений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мурадов, Ю. Компьютерное зрение и искусственный интеллект / Ю. Мурадов, Р. Атаев, А. Беглиева // Матрица научного познания. – 2024. – № 12–2. – С. 60–63.
2. Адаптивные системы технического зрения : монография / В. И. Сырямкин, М. В. Сырямкин, Д. В. Титов [и др.]. – 2-е изд., доп. – Москва : Русайнс, 2026. – 448 с. – ISBN 978-5-466-09728-3.
3. Небаба, С. Г. Сверточные нейронные сети семейства YOLO для мобильных систем технического зрения / С. Г. Небаба, В. В. Мясников // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48, № 3. – С. 414–425.
4. Мамадаев, И. М. Оптимизация производительности алгоритмов распознавания изображений на основе машинного обучения для мобильных устройств на базе операционной системы iOS / И. М. Мамадаев, А. М. Минитаева // Программные системы и вычислительные методы. – 2024. – № 2. – С. 86–98.
5. Quantization and training of neural networks for efficient integer-arithmetic-only inference / Jacob B. [et al.] // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2018. – С. 2704–2713.
6. Sohan, M. A review on yolov8 and its advancements / M. Sohan, Sai Ram T., C. V. Rami Reddy // International conference on data intelligence and cognitive informatics. – Singapore : Springer, 2024. – С. 529–545.
7. YOLOv6+: simple and optimized object detection model for INT8 quantized inference on mobile devices / Moon, H. C. [et al.] // Signal, image and video processing. – 2025. – Т. 19. – № 8. – С. 665.
8. Li, Z. A benchmark for ML inference latency on mobile devices / Z. Li, M. Paolieri, L. Golubchik // Proceedings of the 7th International Workshop on Edge Systems, Analytics and Networking. – 2024. – С. 31–36.
9. Microsoft COCO: common objects in context / T.-Y. Lin, M. Maire, S. Belongie [et al.] // European conference on computer vision. – Cham : Springer International Publishing, 2014. – С. 740–755.



10. Проворова, А. А. Сравнение эффективности применения различных подходов в задаче детекции объекта на изображении низкого качества / А. А. Проворова, И. Ю. Полякова, Е. В. Кузьмичева // Научная визуализация. – 2024. – Т. 16, № 3. – С. 1–13.

SUKHANOVA Nadezhda Timofeevna, candidate of pedagogical sciences, associate professor of the chair of information systems and technologies; ZIMIN Mikhail Aleksandrovich, master degree student of the chair of information systems and technologies

COMPARATIVE ANALYSIS OF QUANTIZATION METHODS FOR OBJECT DETECTORS IN REAL-TIME MOBILE VISION SYSTEMS

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (831) 430-54-92; e mail: ntsuhanova@gmail.com

Key words: machine vision, computer vision, object detection, neural networks, model quantization, mobile systems, real-time, image processing, inference, preprocessing, postprocessing.

This article examines object detection methods for integration into mobile machine vision systems (MVS). It focuses on models from the YOLO family, whose parameter quantization procedures enable the adaptation of high-performance detectors for devices with limited computing resources. A comparative evaluation of three variants of the YOLOv8n object recognition model is presented: without quantization, with partial quantization, and with full integer quantization. Experiments were conducted on a Samsung Galaxy A53 5G smartphone processing a real-time video stream. It was found that full integer quantization does not provide the expected speedup and, on the contrary, reduces overall performance due to increased input data preparation costs. At the same time, a sharp decline in recognition quality is observed, with the model ceasing to detect most objects in the frame. The variant with partial quantization demonstrated results virtually identical to the baseline model and is recognized as the most balanced solution. The paper demonstrates the feasibility of transforming a mobile device into a standalone machine vision module with a deterministic response time. The selection of optimal quantization parameters for single-stage detectors operating within distributed machine vision systems is substantiated. This, in turn, allows for minimizing the computational load without compromising data reliability. The methodology discussed can be applied in the development of mobile monitoring systems, industrial inspection systems, and service robotics.

REFERENCES

1. Muradov Yu., Ataev R., Beglieva A. Kompyuternoe zrenie i iskusstvenny intellekt [Computer vision and artificial intelligence]. Matritsa nauchnogo poznaniya [Matrix of Scientific Cognition]. 2024, № 12-2, P. 60–63.
2. Syryamkin V. I., Syryamkin M. V., Titov D. V. [et al.] Adaptivnye sistemy tekhnicheskogo zreniya [Adaptive machine vision systems]. Izd. 2-e, dop. Moscow, Rusains, 2026, 448 p. ISBN 978-5-466-09728-3.
3. Neibaba S. G., Myasnikov V. V. Svertochnye neyronnye seti semeystva YOLO dlya mobilnykh sistem tekhnicheskogo zreniya [Convolutional neural networks of the YOLO family for mobile machine vision systems]. Kompyuternaya optika [Computer Optics]. 2024, Vol. 48, № 3, P. 414–425.



4. Mamadaev I. M., Minitaeva A. M. Optimizatsiya proizvoditelnosti algoritmov raspoznavaniya izobrazheniy na osnove mashinnogo obucheniya dlya mobilnykh ustroystv na baze operatsionnoy sistemy iOS [Optimization of the performance of image recognition algorithms based on machine learning for mobile devices running the iOS operating system]. Programmnye sistemy i vychislitelnye metody [Software Systems and Computational Methods]. 2024, № 2, P. 86–98.
5. Jacob B. [et al.] Quantization and training of neural networks for efficient integer-arithmetic-only inference. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2018, P. 2704–2713.
6. Sohan M., Sai Ram T., Rami Reddy C. V. A review on yolov8 and its advancements. International conference on data intelligence and cognitive informatics. Singapore: Springer, 2024, P. 529–545.
7. Moon H. C. [et al.] YOLOv6+: simple and optimized object detection model for INT8 quantized inference on mobile devices. Signal, image and video processing. 2025, Vol. 19, No. 8, P. 665.
8. Li Z., Paolieri M., Golubchik L. A benchmark for ML inference latency on mobile devices. Proceedings of the 7th International Workshop on Edge Systems, Analytics and Networking. 2024, P. 31–36.
9. Lin T.-Y., Maire M., Belongie S. [et al.] Microsoft COCO: common objects in context. European conference on computer vision. Cham: Springer International Publishing, 2014, P. 740–755.
10. Provorova A. A., Polyakova I. Yu., Kuzmicheva E. V. Sravnenie effektivnosti primeneniya razlichnykh podkhodov v zadache detektsii obekta na izobrazhenii nizkogo kachestva [Comparison of the effectiveness of various approaches in the task of object detection in a low-quality image]. Nauchnaya vizualizatsiya [Scientific Visualization]. 2024, Vol. 16, № 3, P. 1–13.

© **Н. Т. Суханова, М. А. Зимин, 2026**

Получено: 24.03.2026 г.



УДК 624.014.9:004.942

П. А. ХАЗОВ, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры теории сооружений и технической механики; **С. С. ШИЛОВ**, соискатель ученой степени кандидата технических наук кафедры теории сооружений и технической механики¹, инженерконструктор²; **Н. Д. МОЛОСНОВА**, студент; **А. К. СИТНИКОВА**, аспирант кафедры теории сооружений и технической механики

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГЛОБОИДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ПРИМЕРЕ ЗДАНИЯ В ФОРМЕ ГИПЕРБОЛОИДА ВРАЩЕНИЯ

¹ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (996) 563-68-33; эл. почта: p.m.02@yandex.ru

Тел.: (951) 919-09-19; эл. почта: khazov.nngasu@mail.ru

Тел.: (961) 631-06-81; эл. почта: sergey.shilov.1997@mail.ru

²ООО «Строй-снаб».

Россия, 603000, г. Н. Новгород, ул. Нестерова, д. 33, офис 13.

Ключевые слова: гиперboloид вращения, глобоидная поверхность, верификация, *Ansys CFX*, вычислительная гидродинамика, ветровые нагрузки, специализированное программное обеспечение.

*В статье представлены результаты исследования, в ходе которого сравнивались характеристики специализированной системы для расчета аэродинамических параметров глобоидных поверхностей с данными, полученными в результате моделирования в *Ansys CFX* для здания в форме гиперboloида вращения. Установлено, что в лобовой зоне и на участках безотрывного обтекания сходимость результатов высокая, однако в подветренной области наблюдаются расхождения, связанные с недостаточным охватом геометрических параметров в обучающей выборке и упрощенным учетом трехмерных турбулентных эффектов. Предложены пути дальнейшего развития: расширение параметрической базы и переход к гибридным методам расчета.*

Введение

Задача определения аэродинамических коэффициентов для зданий, геометрическая форма которых описывается гиперboloидом вращения, сопряжена со значительными сложностями, обусловленными нелинейным характером обтекания поверхностей с переменной гауссовой кривизной. Применимость нормативных методик в данном случае оказывается ограниченной.

На стыке возрастающей востребованности объектов со сложными пространственными формами, характеризующимися двоякой кривизной, в современном строительстве и машиностроении [1] и объективных ограничений применимости нормативных методик для их расчета возникает исследовательская проблема, решение которой представляет большой научный интерес.

При проведении комплексного исследования, объединяющего натурные физические эксперименты и численное моделирование, была разработана специализированная вычислительная Система расчета аэродинамических параметров глобоидных поверхностей [2–4]. Данная система ориентирована на автоматизированное получение распределения ветрового давления по поверхности зданий сложной криволинейной геометрии. Однако для ее практического применения необходимо подтверждение корректности выдаваемых результатов.

В качестве объекта исследования выбрано здание, архитектурная форма которого представляет собой гиперboloид вращения. Такая геометрия, обладающая двойкой кривизной, характеризуется сложным характером обтекания воздушным потоком с формированием зон отрыва, присоединения и вихревых структур, что делает ее удобным тестом для верификации специализированных алгоритмов.

Цель данной работы: проведение верификации результатов, получаемых с помощью специализированной Системы расчета аэродинамических параметров глобоидных поверхностей, путем их сопоставления с данными моделирования в комплексе *Ansys CFX*. Для этого выполняется сравнительный анализ распределения аэродинамических коэффициентов по поверхности гиперboloида вращения, рассчитанных в обоих инструментах, что позволяет оценить точность и применимость разработанной системы для инженерных задач.

Методология проведения исследования

Система расчета аэродинамических параметров глобоидных поверхностей представляет собой специализированное программное обеспечение, созданное в рамках работы над разработкой проекта рассматриваемого здания. Ее разработка включала исследование порядка 28 цифровых моделей глобоидных поверхностей с использованием ПК *Ansys CFX* [2–4]; тем актуальнее становится верификация результатов исследования на конкретном примере здания схожей формы.

При анализе результатов компьютерного моделирования аэродинамических особенностей поверхности глобоида было установлено, что имеются 3 характерные картины распределения искомых параметров [2]. Форма здания, рассматриваемого в настоящем исследовании, подходит под картину распределения 3 (рис. 1), при $R1 \neq R2$.

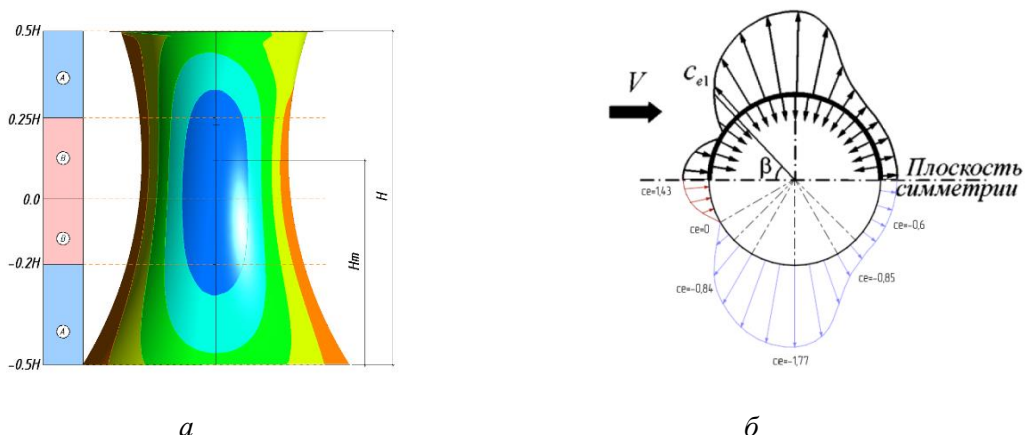


Рис. 1. Картина распределения аэродинамических коэффициентов, согласно исследованию: а – по вертикали; б – сгущение сетки вблизи объекта исследования



В частности, по укрупненным показателям расчета исследованных моделей вся поверхность оболочки, как по горизонтали, так и по вертикали разбита на несколько характерных секторов. Значение коэффициента в этом случае принимается как среднее между экстремальными на границах этих зон. В общем случае, частично рассмотренном также в прил. В.1.12 СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», наблюдается плавное изменение параметра, связанное с увеличением центрального угла координаты расположения точки на поверхности оболочки [2, 5].

Интерфейс программы прост и интуитивно понятен, что делает ее доступным инструментом, не требующим предварительного изучения для комфортной работы. На главном экране предлагается ввести четыре основных геометрических параметра оболочки (R_1 , R_2 , r и H), которые легко измерить или вычислить математически [2].

Моделирование в *Ansys CFX*

Геометрическая модель здания характеризуется малой кривизной образующих, что является отличительной чертой гиперболоидных конструкций. Данная особенность позволила с определенной степенью допущения привести исходную форму к глобоидной поверхности для упрощения расчетов в специализированной системе. Верификация такого допущения стала одной из ключевых задач исследования.

Процесс компьютерного моделирования начинается с построения расчетной области, имитирующей воздушное пространство, окружающее исследуемый объект. Поскольку объект исследования в плане (плоскости ортогональной направлению потока) имеет форму круга, достаточно рассмотреть одно направление ветрового воздействия.

Расчетная область (рис. 2, 3) задана в форме прямоугольного параллелепипеда со следующими размерами: длина составляет $18D$, ширина – $10D$, а высота – $5H$ (где D – наибольший размер формы в плане, H – высота формы) [6–9].

В качестве начальных условий задается профиль скорости ветра, постоянный по высоте. Значение скорости определяется из формулы [10]:

$$v = \left(\frac{w_0}{0,43} \right)^{0,5} = \left(\frac{230,0}{0,43} \right)^{0,5} = 23,1 \frac{м}{с},$$

где: v – нормативная скорость ветра – стационарная составляющая скорости горизонтального перемещения воздушных масс,

w_0 – нормативное значение ветрового давления.

Также задаются граничные условия [9], соответствующие равномерному движению ветрового потока (табл.).

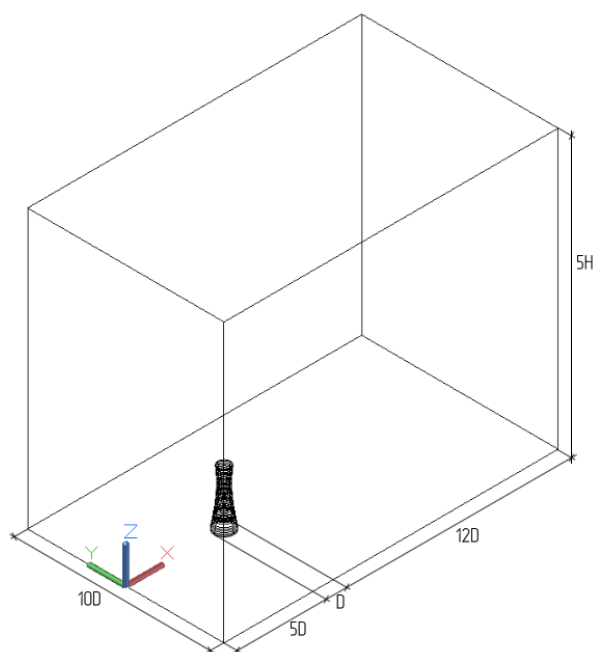
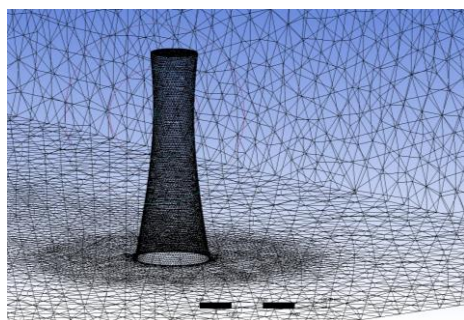
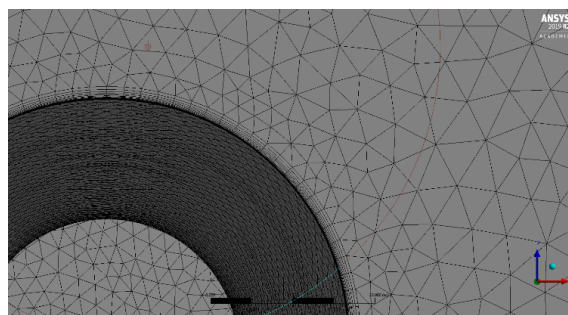


Рис. 2. Моделирование рабочей области



a



б

Рис. 3. Дискретизация рабочей области: *a* – общий вид; *б* – сгущение сетки вблизи объекта исследования

Таблица

Задание начальных и граничных условий

| Граница | Тип условия |
|-------------------------------------|---|
| <i>Inlet</i> (вход) | Профиль скорости ветра, параметры турбулентности |
| <i>Outlet</i> (выход) | Нулевое избыточное давление, параметры турбулентности |
| Верхняя граница | Условие симметрии |
| Нижняя граница, поверхность объекта | Условие непроницаемой стенки |

В ходе вычислительного эксперимента (рис. 4) была зафиксирована особенность сходимости итерационного процесса: в данном случае наблюдалось

сохранение остаточных колебаний, с ненулевой амплитудой, тогда как в классическом случае отклонение, характерное для начальных итераций, полностью затухает.

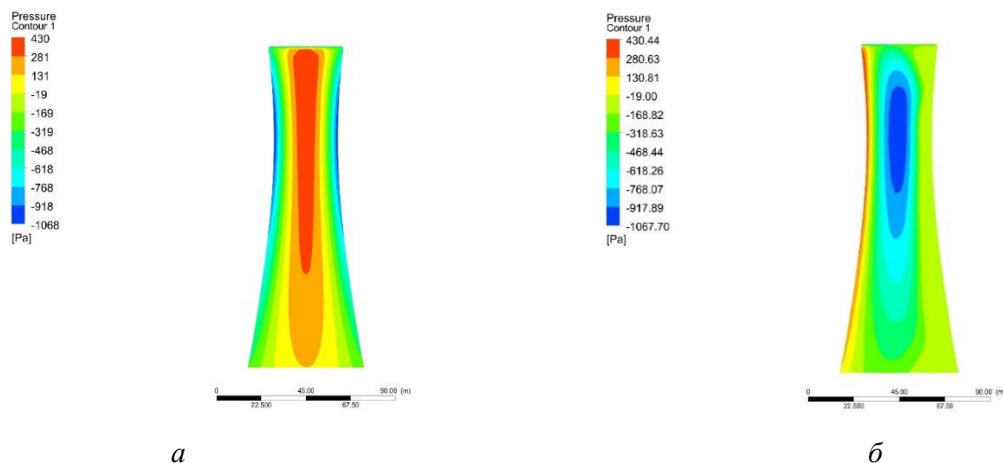


Рис. 4. Распределение ветрового давления по поверхности формы (ограждающим конструкциям здания): *а* – со стороны основного ветрового потока (фронтальная часть); *б* – боковое обтекание (под углом 90° к направлению потока)

Данное явление позволяет выдвинуть предположение о формировании в расчетной области устойчивой автоколебательной структуры течения (рис. 5). Вероятной причиной этого может служить то, что в определенный момент времени часть частиц потока попадает в зону взаимодействия одновременно с нижней (расширенной) и верхней частями гиперболоидной поверхности, в результате чего они оказываются вовлечены в квазипериодический цикл отражения, не покидая область неустойчивого равновесия.

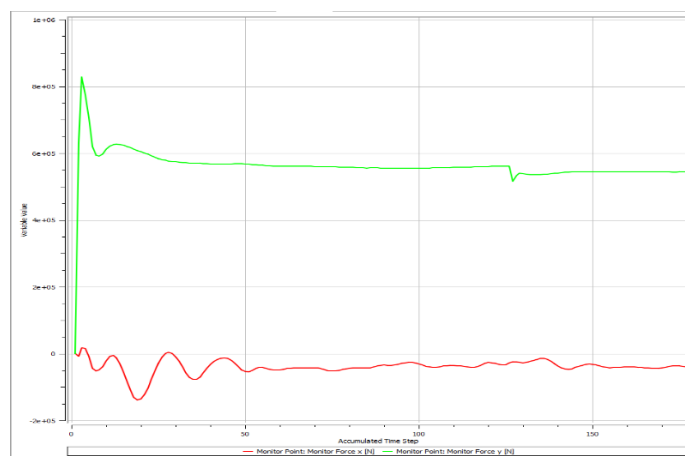


Рис. 5. Иллюстрация итерационного процесса решения в ПБК *Ansys CFX*

В ходе моделирования введением дополнительной переменной для упрощения вывода результатов была получена картина распределения аэродинамических коэффициентов внешнего ветрового давления по поверхности рассматриваемой оболочки (рис. 6) [9]. Полученные данные численно, а также

графически сравнимы с приведенными в методике расчета в прил. В.1.12 СП 20.13330.2016 [5], что дополнительно подтверждает достоверность расчета.

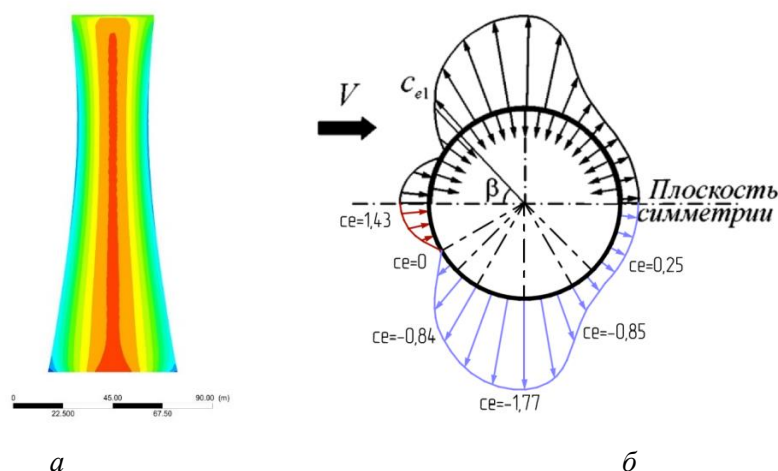


Рис. 6. Картины распределения аэродинамических коэффициентов: *а* – полученная в ходе компьютерного моделирования; *б* – сравнение норматива, приведенного в прил. В.1.12 СП 20.13330.2016 (сверху) с полученными данными (снизу)

Результаты сравнительного анализа и практическая оценка системы

С целью определения соответствия разработанной системы эталону, сравнительный анализ распределения аэродинамических коэффициентов был выполнен для меридиональных линий поверхности и трех характерных сечений: на отм. +9,900, +80,100 и +150,300 м (рис. 7).

Критическое расхождение наблюдается на отметке +80,100 в пределах зоны С. В то время как расчет в ПБК *Ansys CFX* демонстрирует сохранение отрицательных значений давления на подветренной стороне, результаты, полученные с помощью Системы автоматизированного расчета, указывают на возникновение здесь обратного напора.

Причиной этого может являться недостаточная точность аппроксимации исходной геометрии гиперboloида вращения глобоидной поверхностью. Учитывая, что алгоритмы системы базируются на обширной базе данных исследования обтекания в том же ПБК *Ansys CFX*, возможно, причину следует искать в явлении экстраполяции. Несмотря на близость форм, на данном уровне могли присутствовать локальные особенности геометрии, которые и инициировали ранний срыв потока или иную структуру присоединения вихрей, что не было учтено в обобщенной модели, построенной на более гладких или пропорционально иных эталонах [7, 8].

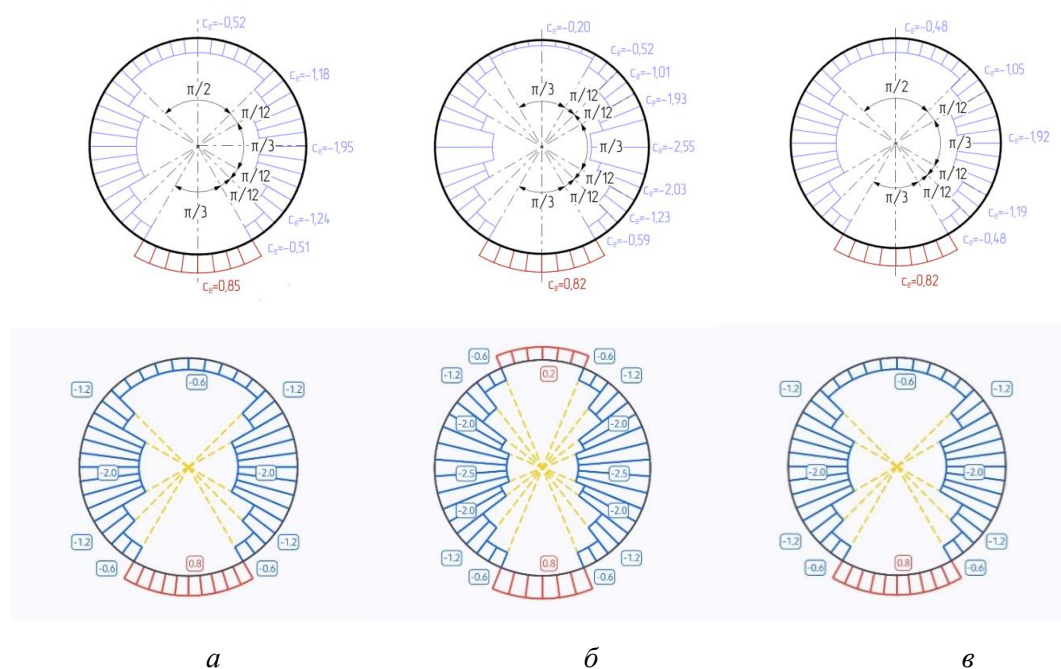


Рис. 7. Картины распределения аэродинамических коэффициентов по расчету: сверху – в ПБК *Ansys CFX*; снизу – в автоматизированной системе: *а* – на отм. +9,900; *б* – на отм. +80,100; *в* – на отм. +150,300

Вместе с тем, система обладает несомненной практической ценностью. Она позволяет стандартизировать определение ветровых нагрузок для поверхностей, не регламентированных нормативными документами (в частности, СП 20.13330.2016 [5]). Универсальность подхода заключается в возможности получения картины давлений для широкого круга глобидных форм без повторения трудоемкого цикла геометрического и сеточного моделирования. Простота использования и стандартизация существенно сокращают время предпроектных изысканий.

Инженер получает возможность оперативно оценивать аэродинамическое качество формы на ранних этапах проектирования, когда выполнение полноценного расчета в *Ansys CFX* нецелесообразно из-за большого количества итераций. Таким образом, система выступает эффективным инструментом экспресс-оценки, дополняя этап детального *CFD*-моделирования.

Заключение

Текущая версия системы ограничена при обработке более сложных и геометрически нестационарных форм из-за принятых упрощений в численных методах. Это накладывает требования на применение и создает поле для дальнейших исследований. Альтернативный путь использования – переход к гибридным методам, где система определяет безотрывные зоны и общий вид распределения коэффициентов, а локальные особенности рассчитываются по полной *CFD*-модели.

Таким образом, при выявленных ограничениях в зонах отрывных течений разработанная система обладает несомненной практической ценностью как стандартизированный инструмент экспресс-анализа, органично дополняющий тяжелые *CFD*-расчеты.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Численное моделирование воздействий ветра на высотные здания / В. Н. Алехин, А. А. Антипин, С. Н. Городилов [и др.] // Современный город: проектирование, строительство и развитие (Ельцинские чтения) : сборник материалов международной научно-практической конференции по строительству и архитектуре, Екатеринбург, 23-24 апреля 2014. – Екатеринбург : УрФУ, 2014. – С. 246–253.
2. Хазов, П. А. Разработка системы автоматизированного определения аэродинамических параметров глобоидных поверхностей / П. А. Хазов, С. С. Шилов, Н. Д. Молоснова // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2025. – № 4. – С. 329–340.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025666216 Российская Федерация. Система автоматизированного расчета аэродинамических коэффициентов на поверхность двоякой кривизны : № 2025666216 : заявл. 05.06.2025 : опубли. 24.06.2025 / Шилов С. С., Хазов П. А., Шилов А. С., Симонов А. В. ; заявитель Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2026612411 Российская Федерация. Система автоматизированного расчета аэродинамических параметров глобоидных поверхностей : № 2026612411 : заявл. 15.01.2026 : опубли. 27.01.2026 / С. С. Шилов, П. А. Хазов, А. С. Шилов, Н. Д. Молоснова; заявитель Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет.
5. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия : свод правил : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 3 декабря 2016 г. № 891/пр : актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* : дата введения 4 июня 2017 г. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (дата обращения: 24.03.2026). – Текст : электронный.
6. Сатанов, А. А. Физическое и численное моделирование аэродинамики большепролетной конструкции при различных направлениях ветрового потока / А. А. Сатанов // Строительная механика и конструкции / Воронежский государственный технический университет. – Воронеж, 2023. – Т. 2, № 37. – С. 87–97. – URL: <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.37.2.009>.
7. Воробьева, Ю. А. Цифровое моделирование ветровых потоков в жилой застройке / Ю. А. Воробьева // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова / Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. – Белгород, 2022. – № 5. – С. 33–40.
8. Aly, A. M. Atmospheric boundary-layer simulation for the built environment: Past, present and future / A. M. Aly // Building and Environment. – 2014. – Vol. 75. – P. 206–221.
9. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Release 2021 R1. – Canonsburg, PA, 2021. – 280 p.
10. ГОСТ Р 56728-2015. Здания и сооружения. Методика определения ветровых нагрузок на ограждающие конструкции : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 ноября 2015 г. № 1892-ст : дата введения 2016-05-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200127225?ysclid=mq97bsbthq937684609> (дата обращения: 12.02.2026). – Текст : электронный.



KHAZOV Pavel Alekseevich, doctor of technical sciences, associate professor of the chair of structural theory and technical mechanics; SHILOV Sergey Sergeevich, applicant for candidate of technical sciences of the chair of structural theory and technical mechanics¹, design engineer²; MOLOSNOVA Natalia Dmitrievna, student; SITNIKOVA Anna Konstantinovna, postgraduate student of structural theory and technical mechanics

ACCURACY EVALUATION OF THE AUTOMATED SYSTEM FOR CALCULATING THE AERODYNAMIC PARAMETERS OF GLOBOID SURFACES: A CASE STUDY OF A HYPERBOLOID OF ROTATION STRUCTURE

¹Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (996) 563-68-33; e-mail: n.m.02@yandex.ru

Tel.: (951) 919-09-19; e-mail: khazov.nngasu@mail.ru

Tel.: (961) 631-06-81; e-mail: sergey.shilov.1997@mail.ru

²Stroy-snab LLC.

33, Nesterova St., office 13, Nizhny Novgorod, 603000, Russia.

Key words: hyperboloid of rotation, globoid surface, verification, Ansys CFX, computational fluid dynamics, wind loads, specialized software.

The article outlines the results of a study comparing the characteristics of a specialized system for calculating the aerodynamic parameters of globoid surfaces with data obtained as a result of modeling in Ansys CFX for a building in the form of a hyperboloid of rotation. It was found that the convergence of the results is high in the frontal zone and in the areas of attached flow; however, discrepancies are observed in the leeward region due to insufficient coverage of geometric parameters in the training sample and simplified consideration of three-dimensional turbulent effects. Ways of further development are proposed: expansion of the parametric base and transition to hybrid computational methods.

REFERENCES

1. Alekhin V. N., Antipin A. A., Gorodilov S. N. Chislennoe modelirovanie vozdeystviy vetra na vysotnye zdaniya [Numerical simulation of wind effects on high-rise buildings]. Sovremennyy gorod: proektirovanie, stroitelstvo i razvitie (Eltsinskie chteniya) [Modern city: design, construction and development (Yeltsin readings)]. materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po stroitelstvu i arkhitekture, Ekaterinburg, 23-24 aprelya 2014. Ekaterinburg, UrFU, 2014, P. 246–253.

2. Khazov P. A., Shilov S. S., Molosnova N. D. Razrabotka sistemy avtomatizirovannogo opredeleniya aerodinamicheskikh parametrov globovidnykh poverkhnostey [Development of an automated system for determining the aerodynamic parameters of globoid surfaces]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2025, № 4, P. 329–340.

3. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2025666216 Rossiyskaya Federatsiya. Sistema avtomatizirovannogo rascheta aerodinamicheskikh koefitsientov na poverkhnost' dvoyakoy krivizny [Automated system for calculating aerodynamic coefficients on a double-curvature surface] : № 2025666216 : zayavl. 05.06.2025 : opubl. 24.06.2025. Shilov S. S., Khazov P. A., Shilov A. S., Simonov A. V. ; zayavitel Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t.

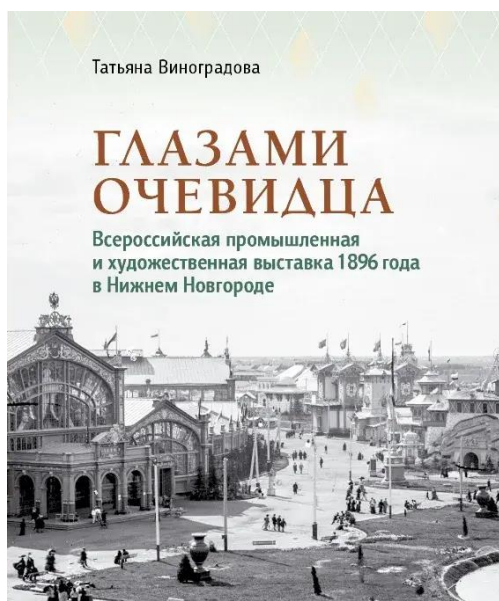


4. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2026612411 Rossiyskaya Federatsiya. Sistema avtomatizirovannogo rascheta aerodinamicheskikh parametrov globovidnykh poverkhnostey [Automated system for calculating the aerodynamic parameters of globoid surfaces] : № 2026612411 : zayavl. 15.01.2026 : opubl. 27.01.2026. Shilov S. S., Khazov P. A., Shilov A. S., Molosnova N. D. ; zayavitel Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t.
5. SP 20.13330.2016. Nagruzki i vozdeystviya [Loads and impacts]. Svod pravil : aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07-85* : utverzhden prikazom Ministerstva stroitelstva i zhilishchno-kommunalnogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ot 3 dekablya 2016 g. № 891/pr : data vved. 04.06.2017. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (accessed: 24.03.2026).
6. Satanov A. A. Fizicheskoe i chislennoe modelirovanie aerodinamiki bolsheproletnoy konstruksii pri razlichnykh napravleniyakh vetrovogo potoka [Physical and numerical modeling of the aerodynamics of a long-span structure under different wind flow directions]. Stroitel'naya mekhanika i konstruksii [Structural Mechanics and Structures]. Voronezh. gos. tekhn. un-t. Voronezh, 2023, Vol. 2, № 37, P. 87–97. URL: <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.37.2.009>.
7. Vorobeva Yu. A. Tsifrovoe modelirovanie vetrovykh potokov v zhiloy zastroyke [Digital simulation of wind flows in residential development]. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova [Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov]. Belgorod. gos. tekhn. un-t. im. V. G. Shukhova. Belgorod, 2022, № 5, P. 33–40.
8. Aly A. M. Atmospheric boundary-layer simulation for the built environment: Past, present and future. Building and Environment. 2014, Vol. 75, P. 206–221.
9. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Release 2021 R1. Canonsburg, PA, 2021. 280 p.
10. GOST R 56728-2015. Zdaniya i sooruzheniya. Metodika opredeleniya vetrovykh nagruzok na ograzhdayushchie konstruksii [Buildings and structures. Method for determining wind loads on enclosing structures] : utverzhden i vveden v deystvie Prikazom Federalnogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 19 noyabrya 2015 g. № 1892-st : data vved. 2016-05-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200127225?ysclid=mq97bsbthq937684609> (accessed: 12.02.2026).

© П. А. Хазов, С. С. Шилов, М. Д. Молоснова, А. К. Ситникова, 2026

Получено: 30.04.2026 г.

НОВЫЕ ИЗДАНИЯ



Виноградова, Т. П. Глазами очевидца : Всероссийская промышленная и художественная выставка 1896 года / Т. П. Виноградова. – Нижний Новгород : Кварц, 2016. – 184 с. : ил. – К 160-летию со дня рождения нижегородского публициста, педагога и краеведа Василия Ивановича Виноградова посвящается.

ISBN 978-5-906698-39-1

Второе расширенное издание книги приурочено к 130-летию одного из самых масштабных событий отечественной истории – XVI Всероссийской промышленной и художественной выставки, проходившей в Нижнем Новгороде в 1896 году. Автор – профессор Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета, почетный гражданин Нижнего Новгорода Т. П. Виноградова – посвящает книгу 170-летию своего деда, педагога, просветителя и публициста Василия Ивановича Виноградова, который одним из первых дал точное и глубокое описание Выставки.

Опираясь на выверенный, документально точный рассказ очевидца, Татьяна Павловна создает объемную и живую историческую панораму рубежа веков, увлекая за собой читателя. Автор приглашает «побывать» на Всероссийской выставке.

Книга наполнена уникальными снимками, выполненными выдающимися мастерами фотографии – А. О. Карелиным и М. П. Дмитриевым, а также цветными репродукциями картин из музейных фондов страны.



Орельская, О. В. Архитектор Сергей Тимофеев / О. В. Орельская. – Нижний Новгород : Юникопи, 2026. – 164 с. : ил. – (Мастера нижегородской архитектуры). – ISBN 978-5 -6055826-7-0.

В апреле 2026 года вышла в свет следующая книга из серии «Мастера нижегородской архитектуры». Автором этой научно-популярной монографии является доктор архитектуры, профессор кафедры архитектурного проектирования ННГАСУ, член-корреспондент РААСН – Орельская Ольга Владимировна – автор 300 научных трудов из которых 30 – монографии.

В книге приводится систематизированный материал по истории нижегородской архитектуры за 70 лет на примере творчества Заслуженного архитектора России Сергея Александровича Тимофеева, профессора ННГАСУ, Ветерана труда. Эта книга о талантливом человеке, высоком профессионале, Учителе многих поколений нижегородских зодчих, приурочена к 90-летию зодчего. В хронологической последовательности приводятся сведения о его творческой биографии, начиная с 1960 годов по настоящее время. Творческий путь С. А. Тимофеева демонстрирует последовательно все этапы отечественной архитектуры второй половины XX века и первой четверти XXI столетия.

Текст книги содержит краткий аналитический обзор его проектов и зданий, которые ярко характеризуют каждый из рассматриваемых периодов развития нижегородской архитектуры, и которые отражают быструю смену основных стилистических течений в новейшей архитектуре XX и первой четверти XXI века. Архитектурные произведения С. А. Тимофеева – заметное явление в архитектуре Нижнего Новгорода. Творчество Мастера достойно представляет нашу нижегородскую архитектуру. Он всегда уделяет особое внимание формообразованию, образной и стилистической выразительности.

Книга иллюстрирована, снабжена ссылками на литературные источники и может быть использована в качестве учебного пособия для студентов по современной истории российской и региональной архитектуры, искусствоведению и краеведению. Она также предназначена архитекторам, реставраторам, историкам, экскурсоводам, специалистам всех гуманитарных профессий, а также для широкого круга читателей, интересующихся историей архитектуры нашего города.



ПЕРЕЧЕНЬ ТРЕБОВАНИЙ И УСЛОВИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ НАУЧНОЙ СТАТЬИ В ПЕРИОДИЧЕСКОМ НАУЧНОМ ИЗДАНИИ «ПРИВОЛЖСКИЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ»

1. Список материалов, необходимых для публикаций научной статьи

1.1. Автор (авторы) в соответствии с приведенными ниже требованиями должен оформить материалы научной статьи: рукопись статьи и сопроводительные документы к ней. Журнал является двуязычным и материалы научной статьи могут подаваться в редакцию на русском или на английском языках (здесь имеется в виду язык основного текста статьи, т.к. часть материалов статьи должна оформляться на обоих языках).

1.2. Рукопись статьи представляется в 2-х экземплярах в печатном виде на листах формата А4 (оформление см. п.2) и в электронном виде (оформление – см. п. 3). ***Печатный и электронный варианты рукописи статьи должны быть идентичны.***

1.3. Сопроводительные документы к рукописи статьи должны включать в себя:

1.3.1. Сопроводительное письмо в 2-х экземплярах в печатном виде на листе формата А4 по утвержденной форме, которая приведена на интернет-сайте журнала: <http://www.pnj.nngasu.ru>. Данное письмо подписывается руководителем организации (юридического лица), откуда исходит рукопись статьи. Если автор статьи не является работником какой-либо организации, не является аспирантом, докторантом, соискателем ученой степени, то сопроводительное письмо подписывается им лично (в этом случае к сопроводительному письму должны прилагаться документы, подтверждающие статус безработного). Для работников ННГАСУ, а также для аспирантов, докторантов, соискателей ученой степени, официально оформленных в ННГАСУ, сопроводительное письмо представлять не требуется.

1.3.2. Экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати в 2-х экземплярах в печатном виде на листах формата А4. Данный документ оформляется по форме, утвержденной в организации, откуда исходит рукопись статьи. Форма экспертного заключения, утвержденная в ННГАСУ, размещена на интернет-сайте журнала: <http://www.pnj.nngasu.ru> (для работников ННГАСУ, а также для аспирантов, докторантов, соискателей ученой степени, официально оформленных в ННГАСУ, данный документ оформляется в секторе результатов интеллектуальной деятельности ОРНД (корпус III, каб. 213-а, тел.: (831) 430-19-34)).

Если в организации, откуда исходит рукопись статьи, нет утвержденной формы экспертного заключения, то в качестве образца может использоваться форма ННГАСУ (при этом автор должен внести соответствующие изменения в наименования должностей и Ф.И.О. ответственных лиц). Если статья представляется не от лица какой-либо организации, а непосредственно физическим лицом, то экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати представлять не требуется.

1.3.3. Лицензионное соглашение (форма лицензионного соглашения приведена на сайте <http://www.pnj.nngasu.ru>), являющееся письменным подтверждением согласия каждого автора с публикацией статьи в «Приволжском научном журнале».

1.3.4. Справка об оригинальности научной статьи из системы

«Антиплагиат», заверенная подписью и печатью организации, в которой выполнена основная часть работы (к рассмотрению принимаются статьи с оригинальностью **не менее 70%**).

1.4. Если авторами статьи являются работники различных организаций (юридических лиц), то сопроводительные документы оформляются от одной из организаций (по усмотрению авторов).

1.5. Если автором статьи является аспирант (без научного руководителя в соавторах), то в число сопроводительных документов должна входить выписка из протокола заседания кафедры, к которой прикреплен аспирант (отдела, научно-технического совета или иного правомочного органа) с рекомендацией статьи к публикации в «Приволжском научном журнале» в 2-х экземплярах в печатном виде на листах формата А4.

2. Правила оформления рукописи научной статьи в печатном виде

2.1. Рукопись статьи (при оформлении основного текста статьи на русском языке) должна включать в себя следующие составные элементы:

- индекс УДК (универсальная десятичная классификация);
- фамилии, инициалы авторов **на русском языке**;
- академические звания, ученые степени и ученые звания авторов **на русском языке** (звания в негосударственных академиях не указывать);
- должности авторов (по основному месту работы, а также по совместительству (если имеется)) **на русском языке** (если автор является аспирантом, докторантом или соискателем ученой степени, то необходимо указать название кафедры, на которой он оформлен);
- название статьи **на русском языке**;
- полное наименование организации (юридического лица), являющегося местом работы автора (основное место работы и совместительство (если имеется)) **на русском языке**;
- контактная информация для переписки (основное место работы и совместительство (если имеется)) **на русском языке**: почтовый адрес организации (с указанием индекса); номер телефона, адрес электронной почты;
- ключевые слова **на русском языке** (3-5 слов и (или) словосочетаний);
- аннотация статьи **на русском языке** (общий объем не более 0,3 стр.);
- основной текст статьи **на русском языке**;
- сведения о финансировании (при наличии);
- авторский вклад и указание об отсутствии конфликта интересов;
- библиографический список **на русском языке** (не менее 10 (десяти) источников);
- фамилии, имена, отчества (полностью) авторов **на английском языке**;
- академические звания, ученые степени и ученые звания авторов **на английском языке** (звания в негосударственных академиях наук не указывать);
- должности авторов (по основному месту работы, а также по совместительству (если имеется)) **на английском языке** (если автор является аспирантом, докторантом или соискателем ученой степени, то необходимо указать название кафедры, на которой он оформлен);
- название статьи **на английском языке**;
- полное наименование организации (юридического лица), являющегося местом работы автора (основное место работы и совместительство (если имеется)) **на английском языке**;



- контактная информация для переписки (основное место работы и совместительство (если имеется)) **на английском языке**: почтовый адрес организации (с указанием индекса); номер телефона, адрес электронной почты;
- ключевые слова на английском языке (3 – 5 слов и (или) словосочетаний);
- аннотация статьи на английском языке (общий объем не более 0,3 стр.);
- библиографический список на английском языке (не менее 10 (десяти) источников);

- знак охраны авторского права, состоящий из следующих элементов: латинская буква «С» в окружности, инициалы и фамилии авторов на русском языке, год направления статьи в редакцию.

Расположение и оформление вышеперечисленных частей рукописи статьи должно соответствовать образцу оформления научной статьи, который размещен на интернет-сайте журнала: <http://www.pnj.nngasu.ru>.

2.2. Рукопись статьи (при оформлении основного текста статьи на английском языке) должна включать в себя те же составные элементы, которые указаны в п. 2.1. При этом русскоязычное написание заменяется на англоязычное, а англоязычное – на русскоязычное.

2.3. Основной текст статьи должен быть структурирован: «Введение», не менее 2-х разделов (например, «Материалы и методы», «Результаты исследования» или другие разделы по усмотрению авторов), «Выводы» или «Заключение».

2.4. При оформлении рукописи статьи необходимо соблюдать следующие требования:

2.4.1. Текст рукописи статьи набирается на компьютере в текстовом редакторе «Microsoft Word» и распечатывается на принтере на листах бумаги формата А4 с одной стороны. Плотность бумаги 80 г/м². Размеры полей страниц: верхнее 25 мм, нижнее 25 мм, левое 25 мм, правое 25 мм. Страницы должны быть пронумерованы в нижней правой части.

2.4.2. Текст рукописи статьи набирается шрифтом Times New Roman Cyr. Шрифт № 14 с межстрочным интервалом 1,0 (одинарный) используется для набора следующих частей рукописи: индекс УДК, Ф.И.О. авторов, ученые степени и ученые звания авторов, должности авторов, название статьи. Шрифт № 14 с межстрочным интервалом 1,5 (полуторный) используется для набора следующих частей рукописи: основной текст статьи, знак охраны авторского права. Шрифт № 12 с межстрочным интервалом 1,0 (одинарный) используется для набора следующих частей рукописи: наименование организации (места работы авторов), контактная информация (адрес организации и др.), аннотация статьи (набирается курсивом), ключевые слова, библиографический список.

2.4.3. Буквы русского и греческого алфавитов (в том числе индексы), а также все цифры (в том числе индексы) необходимо набирать прямым шрифтом, а буквы латинского алфавита – курсивом. Аббревиатуры, стандартные функции (Re, sin, cos и т.п.) и символы химических элементов набираются прямым шрифтом.

2.4.4. Текст статьи может включать формулы, которые должны набираться только с использованием редактора формул «Microsoft Word». Шрифт формул должен соответствовать требованиям, предъявляемым к основному тексту статьи (см. выше). В статье должен быть необходимый минимум формул, все второстепенные и промежуточные математические преобразования при

необходимости могут выноситься в приложение к статье (в качестве поясняющей информации для рецензента).

2.4.5. Текст статьи может включать таблицы, а также графические материалы (рисунки, графики, фотографии и др.). Данные материалы должны иметь сквозную нумерацию и названия. На все таблицы и графические материалы должны быть сделаны ссылки в тексте статьи. При этом расположение данных объектов должно быть после ссылок на них. Шрифт таблиц должен соответствовать требованиям, предъявляемым к тексту статьи (см. выше). Шрифт надписей внутри рисунков, таблиц, графиков, фотографий и др. графических материалов Times New Roman Cyr, размер № 12, межстрочный интервал 1,0 (одинарный). В случае использования в статье цветных графических материалов (рисунки, графики, фотографии и др.) их необходимо скомпоновать на четном количестве страниц – либо на 2-х, либо на 4-х отдельных страницах (но не более 4-х страниц). К данным рисункам должны быть сделаны подписи, а в тексте статьи на них должны быть ссылки. Использование цветных графических материалов должно быть оправданным (в тех случаях, когда их нельзя заменить черно-белым аналогом).

2.4.6. Библиографический список должен быть оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5-2008 (с учетом вступления в силу последующих версий данного документа). Нумерация литературных источников в списке дается в порядке последовательности ссылок. На все литературные источники должны быть ссылки в тексте статьи (в квадратных скобках). В библиографический список включаются только те работы (документы), которые опубликованы в печати на момент представления рукописи статьи в редакцию. Количество литературных источников в списке должно быть не менее 10 (десяти). В качестве цитируемых литературных источников должны использоваться научные статьи, опубликованные за последние 5 лет в российских и зарубежных рецензируемых научных периодических изданиях. Самоцитирование – не более 30%. Не допускается ссылаться на учебники и учебные пособия, научно-популярную и нормативную (СП, ГОСТы и т.п.) литературу, если они не являются объектом исследования. В англоязычном варианте библиографического списка русскоязычные литературные источники должны быть представлены в транслитерации, на латинице. Кроме того, названия статей и названия журналов переводятся на английский язык (перевод указывается в квадратных скобках). Библиографические описания англоязычных изданий приводятся в оригинальном виде. Для изданий на других языках названия статей и названия журналов должны быть переведены на английский язык (перевод указывается в квадратных скобках).

2.4.7. Применение инструментов искусственного интеллекта должно документироваться авторами статьи в разделе методов исследования. Редакция имеет право отклонить рукопись, если, в том числе с использованием технических средств, установлен факт использования инструментов искусственного интеллекта, не отраженный в тексте статьи.

2.4.8. Объем рукописи статьи (включая черно-белые и цветные графические материалы), оформленной с учетом вышеперечисленных требований, не должен превышать: а) 11 (одиннадцать) страниц при наличии в тексте не менее 3-х графических материалов (рисунков, графиков, фотографий); б) 8 (восемь) страниц во всех остальных случаях.



2.5. Рукопись статьи должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (лично) с обратной стороны последней страницы с указанием даты представления рукописи в редакцию (число.месяц.год).

3. Правила оформления рукописи научной статьи в электронном виде

3.1. В электронном виде необходимо представить файл, подготовленный в редакторе «Microsoft Word» (тип файла «doc» или «docx» или «rtf»). Данный файл должен включать рукопись статьи (подготовленной в соответствии с п. 2) со вставленными в текст графическими материалами (если они имеются). В названии файла должна присутствовать фамилия автора статьи. Файл необходимо направить на электронную почту ответственного секретаря «Приволжского научного журнала» – pnj-sec@mail.ru.

3.2. Каждый отдельный графический материал (рисунок, график, фотография и др.) должен быть записан в виде отдельного файла, при этом названия файлов должны соответствовать нумерации данных материалов (например: «Рис.1»). Представление графиков, рисунков и т. п. графических материалов в виде отсканированных изображений не допускается. Файлы фотографий должны иметь расширение «jpg». Диаграммы, графики и прочие графические материалы, построенные в табличном редакторе EXCEL должны быть также вставлены в текст документа как графический материал (в формате «jpg»). Качество всех графических материалов должно быть высоким (не ниже 300 dpi).

4. Порядок представления в редакцию материалов научной статьи

Подготовленные с учетом всех вышеперечисленных требований материалы научной статьи (рукопись статьи и сопроводительные документы к ней) должны быть запечатаны в конверт формата А4, на котором указывается адрес редакции: *Россия, 603952, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65. ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».* Ответственному секретарю «Приволжского научного журнала» *Хазову П.А.*

Конверт с материалами может быть отправлен в редакцию журнала по почте, с использованием курьерской доставки или доставлен лично автором (доверенным лицом автора). В случае отправки с использованием курьерской доставки, а также в случае личной доставки, конверт необходимо сдавать в отдел документооборота и делопроизводства ННГАСУ (г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65, корпус I, 1-й этаж, каб. 127).

Также материалы необходимо направить на электронную почту ответственного секретаря «Приволжского научного журнала» – pnj-sec@mail.ru.

5. Порядок рассмотрения редакцией материалов научной статьи и ее рецензирования

5.1. После получения материалов научной статьи ответственный секретарь журнала проводит оценку их достаточности и правильности оформления. В случае отклонений от установленных требований, автору по электронной почте направляется письмо с уведомлением: «Материалы научной статьи не соответствуют требованиям, установленным редакцией журнала».

5.2. Материалы статей, оформленные в соответствии с установленными требованиями, ответственный секретарь регистрирует и направляет для рассмотрения члену редакционной коллегии журнала, который имеет соответствующую специальность (по номенклатуре специальностей научных работников, утвержденной Минобрнауки России). Член редакционной коллегии

организует рецензирование (экспертную оценку) рукописи научной статьи в соответствии с порядком, установленным редакцией журнала. С составом редакционной коллегии, в т. ч. с научными специальностями ее членов, а также с «Порядком рецензирования научных статей» можно ознакомиться на интернет-сайте «Приволжского научного журнала»: <http://www.pnj.nngasu.ru>.

5.3. Если на статью получена положительная рецензия, то она включается в план публикации соответствующего тематического раздела журнала. Автору статьи по электронной почте направляется копия рецензии (без указания личности рецензента) и уведомление «Включено в план публикации». Сроки и очередность опубликования устанавливаются редакцией с учетом количества статей, находящихся в плане публикации соответствующего тематического раздела журнала. Как правило, дата приема статей для издания очередного номера устанавливается не позднее, чем за 4 (четыре) месяца до месяца выхода (например, для № 1 (март) этот срок должен быть не позднее 01 ноября). При этом дата устанавливается по дате получения редакцией положительной рецензии на статью.

5.4. Если на статью получена рецензия с замечаниями, но рецензент указывает на возможность публикации статьи после доработки, то автору статьи по электронной почте направляется копия рецензии (без указания личности рецензента) и уведомление «На доработку». Порядок оформления, представления и рассмотрения доработанных рукописей статей такой же, как для вновь поступающих статей. К доработанной рукописи статьи необходимо приложить документ «Ответы на замечания рецензента», оформленный в свободной форме в печатном виде на листах формата А4, в 2-х экземплярах. Ответы даются на каждое замечание (по пунктам), внизу ставятся личные подписи всех авторов с указанием даты представления доработанной рукописи в редакцию (число.месяц.год). Подписи авторов должны быть заверены канцелярией или отделом кадров организации, откуда исходит рукопись статьи. Сопроводительные документы к рукописи статьи (по п. 1.3) переоформляются только в том случае, если при доработке изменяется название статьи и (или) изменяется авторский коллектив.

5.5. Если на статью получена отрицательная рецензия (рецензия с замечаниями, без указания на возможность публикации статьи после доработки), то автору статьи по электронной почте направляется копия рецензии (без указания личности рецензента) и уведомление «Не рекомендуется к публикации».

5.6. Не допускаются к публикации в «Приволжском научном журнале»:

- статьи, содержащие ранее опубликованный материал;
- статьи, оформленные без соблюдения правил оформления статей;
- статьи, авторы которых не исполняют требования редакции по технической доработке статей;
- статьи, авторы которых не выполняют конструктивные замечания рецензента или аргументированно не опровергают их.

5.7. Редакция не вступает с авторами в содержательное обсуждение статей, переписку по методике написания и оформления научных статей и не занимается доведением текстов статей до необходимого научно-методического уровня.

6. Общие требования и условия публикации

6.1. Редакцией не принимаются к рассмотрению: 1) научные статьи, не соответствующие тематическим направлениям журнала, по которым



осуществляется рецензирование (экспертная оценка). Данные направления соответствуют научным направлениям членов редакционной коллегии журнала (по номенклатуре специальностей научных работников, утвержденной Минобрнауки России); 2) научные статьи, публиковавшиеся ранее; 3) материалы, не соответствующие установленным редакцией требованиям; 4) рекламные материалы.

6.2. Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения рукописей статей. Редакция имеет право частично или полностью предоставлять материалы научных статей в российские и зарубежные организации, обеспечивающие индексы научного цитирования, а также размещать данные материалы на интернет-сайте журнала.

6.3. Авторский коллектив, направляющий научную статью в редакцию журнала, несет ответственность за неправомерное использование объектов интеллектуальной собственности, объектов авторского права или «ноу-хау» в полном объеме, в соответствии с действующим законодательством.

6.4. Авторские права на каждый номер журнала (в целом) принадлежат учредителю журнала – федеральному государственному бюджетному образовательному учреждению высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (ННГАСУ). Перепечатка материалов «Приволжского научного журнала» без разрешения редакции запрещена, ссылки на журнал при цитировании обязательны.

6.5. Материалы научных статей, направляемые в редакцию журнала, авторам не возвращаются. Вознаграждение (гонорар) за опубликованные научные статьи не выплачивается.

6.6. Оплата за опубликование научных статей редакцией не взимается.



**ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА
НА ПЕРИОДИЧЕСКОЕ НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ
«ПРИВОЛЖСКИЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ»**

Основан в 2006 году

Периодичность – ежеквартально

Журнал рассчитан на профессорско-преподавательский состав, аспирантов, а также студентов старших курсов вузов, работников научно-исследовательских и проектных институтов, инженерно-технический персонал организаций и предприятий.

Журнал имеет разделы:

Строительные конструкции, строительная механика и гидротехническое строительство (2.1.1, 2.1.6, 2.1.9);

Инженерные сети и сооружения, инженерная гидрология, экологическая безопасность и охрана водных ресурсов (2.1.3, 2.1.4, 2.1.10);

Технология и организация строительства, производство строительных материалов и изделий (2.1.5, 2.1.6, 2.1.7);

Архитектура и градостроительство (2.1.11, 2.1.12, 2.1.13);

Геометрическое и компьютерное моделирование технических систем, цифровая поддержка жизненного цикла изделий (2.1.1, 2.1.9, 2.5.1).

Каталожная цена за 6 месяцев – 1000 руб.

Цена отдельного номера – 500 руб.

Подписной индекс по каталогу «Урал-Пресс»: 80382

**Адрес редакции: Россия, 603952, г. Нижний Новгород,
ул. Ильинская, д. 65.**

Тел./факс: (831) 433-04-36, 430-19-36

